Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.

AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO

III

TOMO II

BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS



DECLARACIÓN LEGAL

EDITORES
Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
María Eugenia Sánchez Morales
Alexandra Monsetrrat García

ISBN GENERAL 978-607-8821-655
Fecha de otorgamiento 02-09-2026

Biotecnología y Ciencias Agropecuarias ISBN 978-607-8821-679
Fecha de otorgamiento 02-09-2026

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores.

Temacilli EDITORIAL
Lagos de Moreno, Jalisco
http:/temacilli-editorial.com

D. R. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, C. P. 37150, León, Guanajuato México.

Hecho en México





PREFACIO

En esta colección se presentan contribuciones de investigación y desarrollo tecnológico realizadas en diversas áreas de la ciencia, cuyo objetivo principal es contribuir a la difusión del quehacer científico y tecnológico que se realiza en México, así como promover el trabajo interdisciplinario entre miembros de diferentes disciplinas científicas.

El presente trabajo está organizado en siete tomos los cuales corresponden a las siguientes áreas científicas: I) Biología y química, II) Biotecnología y ciencias agropecuarias, III) Ciencias sociales, IV) Físico matemáticas y ciencias de la tierra, V) Humanidades, ciencias de la conducta y divulgación científica, VI) Ingenierías, así como VII) Medicina y ciencias de la salud.

Septiembre de 2026
León, Gto., México

Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
María Eugenia Sánchez Morales
Alexandra Monsetrrat García

ÍNDICE

MI CONTRIBUCIÓN A LA ECOLOGÍA DE UNGULADOS 7

CONTROL FITOSANITARIO DE *Fusarium* Spp. MEDIANTE TERAPIA FOTODINÁMICA CON ROSA DE BENGALA 14

GRANA COCHINILLA USADA EN EL TEÑIDO DE PIELES DE CONEJO TRATADAS CON CURTIENTES NATURALES 19

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE *Agave Cupreata* Y SU RELACIÓN CON LA ALTITUD Y TIPO DE SUELO EN LA REGIÓN CENTRO DEL ESTADO DE GUERRERO 24

EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODIFICACIÓN POR ACETILACIÓN DEL MUCÍLAGO DE *Opuntia Atropes* 29

DESARROLLO DE UNA BEBIDA FERMENTADA CARBONATADA A PARTIR DE LA CÁSCARA DE LA PIÑA (*Ananas Comosus)* Y KEFIR DE AGUA, COMO ALTERNATIVA DE BEBIDA FUNCIONAL 40

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE HARINA DE SEMILLA DE GUAYABA (*Psidium Guajava* L.): RESIDUO AGROINDUSTRIAL 46

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR 54

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y PROXIMAL DE HOJAS DESHIDRATADAS DE *Psidium Guajava L.* (VARIEDADES CRIOLLA VERDE Y CRIOLLA AMARILLA) 59

EFECTOS DE LA NIXTAMALIZACIÓN EN PROTEÍNAS Y PERFIL DE AMINOÁCIDOS DE TORTILLAS DE MAÍCES CRIOLLOS DE ARANTEPACUA, MICHOACÁN, MÉXICO 69

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTIMULACIÓN CON CAMPOS MAGNÉTICOS PERMANENTES EN SEMILLAS DE *Capsicum Annuum* SEMBRADAS EN TIERRA 76

EFECTOS BIOESTIMULANTES DEL NEODIMIO EN PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS Y CONCENTRACIÓN DE NITRATO EN LECHUGA HIDROPÓNICA 83

PAPAÍNA COMO ALTERNATIVA BIOTECNOLÓGICA EN EL CONTROL IN VITRO DE *Staphylococcus Aureus* ASOCIADO A MASTITIS BOVINA 88

POTENCIAL DEL HUAUZONTLE (*Chenopodium Berlandieri Subsp. Nuttalliae*) COMO CULTIVO TOLERANTE A LA SALINIDAD 93

DESARROLLO DE UN NANOMATERIAL BASADO EN ÓXIDO DE GRAFENO Y NUTRIENTES ESENCIALES (N, P, K) Y SU EFECTO EN LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO INICIAL DEL JITOMATE 98

RESPUESTA VARIETAL DE CAÑA DE AZÚCAR A LA MULTIPLICACIÓN *IN VITRO* PARA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS 105

CUANTIFICACIÓN DE CAROTENOIDES DE OLEORRESINAS A PARTIR DE LA EXTRACIÓN DE LA FLOR DE CEMPASÚCHIL 109

BIOCOLINA EN VERRACOS: UNA ESTRATEGIA SUSTENTABLE PARA OPTIMIZAR LA FERTILIDAD 116

EFECTO DEL HUMUS DE LOMBRIZ EN EL CULTIVO DEL RÁBANO *(Raphanus Sativus* L.*)* ... 125

CONCENTRACIÓN FOLIAR DE ZINC EN PLANTAS DE TRES VARIEDADES DE CHILE (*Capsicum Annuum* L.) EN RESPUESTA AL TRATAMIENTO CON CADMIO 132

ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREVIOS INTERNACIONALES RELACIONADOS CON LA CONSOLIDACIÓN DE MADERA PATRIMONIAL CON ATAQUE XILÓFAGO Y SU CARACTERIZACIÓN FISICO-MECÁNICA 136

APLICACIÓN DE RIZOBACTERIAS EN PLANTAS DE ZINNIA ELEGANCE 144

PROSPECCIÓN METAGENÓMICA DE ENZIMAS CON POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO ASOCIADAS A LA PLASTISFERA EN AMBIENTES TERRESTRES Y ACUÁTICOS 151

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ZEOLITA EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ..... 162

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum Lycopersicum*) CON ZEOLITA COMO MEJORADOR DE SUELO 167

ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS HIDROLIZADOS DE LA SEMILLA DE AGUACATE..... 173

EFECTO DE LA EDAD EN EL DESARROLLO *IN VITRO* DE EMBRIONES PARTENOGENÉTICOS DE GATA DOMÉSTICA 183

EVALUACIÓN DE *Sesuvium Portulacastrum* COMO PLANTA FITORREMEDIADORA A LA SALINIDAD EN SUSTRATO COMERCIAL 188

EXTRACCIÓN DE PIGMENTOS DE BRÁCTEAS DE BUGAMBILIA FUCSIA (*Bouganvillia Glabra*) PARA SU APLICACIÓN COMO COLORANTE EN ALIMENTOS SOSTENIBLES 196

TECNOLOGÍA ALIMENTARIA CIRCULAR APLICADA A CITRUS RETICULADA: DESARROLLO DE GOMITAS FUNCIONALES CON APROVECHAMIENTO INTEGRAL DEL FRUTO..... 205

CAMBIOS EN LA CALIDAD MICROBIOLOGICA DE TORTILLA DE MAÍZ ELABORADA EN EL BANCO DE ALIMENTOS DE MÉXICO BAMX SEDE TEPATITLÁN, DURANTE SU ALMACENAMIIENTO..... 211

PROPUESTA DE ALIMENTOS FUNCIONALES ENRIQUECIDOS CON SEMILLAS DE CHÍA: GALLETAS FUNCIONALES SABOR CACAO ENRIQUECIDAS CON HARINA DE CHÍA (*Salvia Hispanica L.*)..... 218

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUA DE LAGO DE GUADALUPE 228

POTENCIAL SINÉRGICO DE QUITOSANO Y RIZOBACTERIAS PARA MEJORAR EL CRECIMIENTO DE LISIANTHUS 232

RESPUESTA DEL AGUACATE 'VELVICK' A LA APLICACIÓN DE SILICIO PARA SU ESTABLECIMIENTO IN VITRO 237

ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD ANTIBACTERIANA DE EXTRACTOS CRUDOS DE *Lentinula Edodes* 242

LA APLICACIÓN FOLIAR DE TITANIO (Ti) AFECTA CRECIMIENTO INICIAL Y UNIDADES SPAD EN ACELGA..... 250

DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA EN ESPECIES ARBÓREAS URBANAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO: BASE PARA LA ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO 254

EVALUACIÓN DE UN CONSORCIO MICROBIANO ENCAPSULADO Y SU EFECTO EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO TEMPRANO DE JITOMATE 262

EFECTO DE LA ACLIMATIZACIÓN DE PLÁNTULAS OBTENIDAS POR MULTIPLICACIÓN IN VITRO EN VARIEDADES DE CAÑA 273

MADURACIÓN IN VITRO DE OVOCITOS DE GATA SEGÚN LA EDAD DE LA HEMBRA..... 277

EFECTO ELICITOR DE NANOPARTICULAS DE QUITOSAN/ADN EN *Solanum Lycopersicum L* EN LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS TOTALES 283

PRODUCCIÓN DE ENZIMAS EXTRACELULARES Y POLISACÁRIDO DE LEVAN POR BACTERIAS HETERÓTROFAS AISLADAS DE UN NIDO DE HORMIGAS LOCALIZADO EN EL CERRO CUTHA (TEHUACAN, PUEBLA) 290

COMBINANDO QUELITES..... 295

ESTUDIO MICROBIOLÓGICO DEL BIODETERIORO FÚNGICO EN DOCUMENTOS JURÍDICOS HISTÓRICOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL ESTADO DE ZACATECAS: PROPUESTA DE CONSERVACIÓN PREVENTIVA 303

TÉCNICA DE LAVADO, VARIABLE DE CONTROL EN LA REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD Y TRANSFERENCIA DE MASA EN CASCARÓN DE HUEVO 308

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE ELECTROFITORREMEDIACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOINSECTICIDA CONTRA *Brevicoryne Brassicae* 313

COMPARACIÓN DE DOS RAZAS DE GALLINAS PONEDORAS (RHODE ISLAND VS LEGHORN) EN SISTEMA DE PRODUCIÓN URBANA 321

ESTUDIO COMPARATIVO DE NANOCELULOSA DERIVADA DE RESIDUOS DE PIÑA (*Ananas Comosus*) Y MANGO (*Mangifera Indica)* 327

ESTUDIO PILOTO INTERDISCIPLINARIO SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN UNA COMUNIDAD UNIVERSITARIA 334

VARIABLIDAD DE LA MATERIA SECA, pH Y HUMEDAD EN EL ENSILADO DE AGAVE CON INCLUSIÓN DE DIFERENTES NIVELES DE HOJA DE MEZQUITE 342

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEGRADATIVO DE PLÁSTICOS MEDIANTE LA ACCIÓN DE EXTRACTOS ENZIMÁTICOS DE *Rossellomorea Vietnamensis* 353

EVALUACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS CON CAPACIDAD ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE *Justicia Secunda Vahl* Y *Stevia Rebaudiana Bertoni* 360

INFLUENCIA DE DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA LED EN EL RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE *Pleurotus Ostreatus* 372

ESTUDIO DEL EFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO DE ALTA INTENSIDAD SOBRE LA VIDA ÚTIL DE ARÁNDANOS AZULES (*Vaccinium Sp)* 377

DESARROLLO Y EVALUACIÓN SENSORIAL DE GOMITAS FUNCIONALES ELABORADAS CON EXTRACTOS FOLIARES DE *Passiflora Edulis* COMO ESTRATEGIA DE VALORIZACIÓN AGROINDUSTRIAL 391

EFECTO DEL TITANIO EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE RÁBANO 400

DE LA SÍNTESIS VERDE A LA APLICACIÓN AGRÍCOLA Y LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA 404

VALORACIÓN DE PARÁMETROS AGRONÓMICOS EN NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR 417

CONSUMO RELATIVO DE FIBRA DE AGAVE EN OVINOS UTILIZANDO UN MÉTODO DE CAFETERÍA 422

PRESENCIA AMBIENTAL DE PARÁSITOS ZOONÓTICOS Y SU IMPACTO EN LA SALUD HUMANA 428

DETERMINACIÓN DE VALORES DE REFERENCIA PARA PROTEINAS TOTALES, LEUCOCITOS Y MICROHEMATOCRITO DE *Phoenicopterus Ruber* BAJO CUIDADO PROFESIONAL 434

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ALTERNATIVOS PARA EL CULTIVO DE ARÁNDANO *(Vaccinum Corymbosum L.)* 441

USO DEL BAGAZO DE AGAVE (*Agave Tequilana Var. Weber Azul*) DESECHADO DE LA PRODUCCIÓN DE TEQUILA PARA EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS DE *Capsicum Annuum Var Poblano* EN MACROTÚNEL 451

CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA DE BACTERIAS AISLADAS DE TRES PUNTOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DEL AGUA DE TLACUILOTEPEC (CUAUTEPEC, PUEBLA) 461

HIDROPONÍA SOSTENIBLE PARA IMPULSAR UN JARDÍN POLINIZADOR EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CUAUTITLÁN IZCALLI 467

CARBONATO DE CALCIO DE ALTA PUREZA 475

ALTERACIONES MORFOLÓGICAS EN *Tetraselmis Sp.* INDUCIDAS POR GLUFOSINATO DE AMONIO, GLIFOSATO Y SU INTERACCIÓN BINARIA: IMPLICACIONES ECOTOXICOLÓGICAS EN SISTEMAS ACUÁTICOS 480

DINÁMICA DEL PROTEOMA DURANTE LA ELABORACIÓN Y CURACIÓN DEL QUESO DE PORO 487

EFECTO DE BEBIDA CON EDULCORANTE EN LA IMPLANTACIÓN EMBRIONARIA DEL HAMSTER 491

EFECTO DEL ELECTROMAGNETISMO SOBRE EL DESARROLLO DE CEMPASUCHIL (*Taguedes Erecta)* 498

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE *Pseudomonas Spp.* AISLADAS EN NAYARIT UTILIZANDO POLIETILENGLICOL COMO ÚNICA FUENTE DE CARBONO 505

NANOPARTÍCULAS DE PLATA (AgNPs) INDUCEN ESTRÉS OXIDATIVO EN EL SIMBIOSISTEMA *Azolla-Anabaena Azollae* 513

LEGUMBRES COMO ALTERNATIVA PROTEICA SOSTENIBLE EN LA ALIMENTACIÓN DE ANIMALES NO HUMANOS 521

ECOGRAFÍA REPRODUCTIVA EN CINCO TAXONES DE SERPIENTES HEMBRAS..... 532

CARACTERIZACIÓN CROMÁTICA DE LA MIEL DE ABEJA EN MÉXICO: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MEDIANTE EL SISTEMA CIE *L*a*b** Y ESCALA PFUND 538

EFECTO DE LA ILUMINACIÓN LED EN LA FIRMEZA Y ACEPTABILIDAD SENSORIAL DEL *Pleurotus Ostreatus*..... 545

CARACTERIZACIÓN FíSICO-QUíMICA DE LODOS ANAEROBIOS TRATADOS Y SU POTENCIAL USO COMO COMPONENTES DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE HORTALIZAS 550

MORFOMETRIA Y COMPOOSICION HISTOQUIMICA DE CUATRO VARIEDADES DE *Phaseolus Vulgaris L.*..... 555

EL LITIO AUMENTA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILAS EN HOJAS DE MAÍZ (*Zea Mays* L.) cv. HS-2 560

PRUEBAS DE DERMATOMICOSIS EN CANINOS Y SU ESTUDIO DE PREVALENCIA 565

POTENCIAL EFECTO BIOESTIMULANTE DE *Azospirillum Brasilense* Y FOSFITO EN PLÁNTULAS DE CAÑA DE AZÚCAR..... 570

SIMULACIÓN DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL IN SILICO Y PREDICCIÓN DEL POTENCIAL BIOACTIVO DE PÉPTIDOS DE AMARANTO (*A. Cruentus Y A. Hypochondriacus)* 575

DEGRADACIÓN DE CAFEÍNA POR MICROORGANISMOS AISLADOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO HUMEDO (FERMENTACIÓN) DEL CAFÉ 586

PÉPTIDOS CON POTENCIAL ANTIHIPERTENSIVO Y ANTIDIABÉTICO DERIVADOS DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL IN SILICO DE PROTEÍNAS DE *Chenopodium Pallidicaule* . 597

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO EN CANAL DE CONEJOS ALIMENTADOS CON SUERO DE LECHE..... 607

EFECTO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MULTIPLE SOBRE LA DINÁMICA DE IMBIBICIÓN Y GERMINANCIÓN DE *Zea Mays L.*: ESTABLECIENDO UNA BASE BIOFISICOQUÍMICA..... 613

PROPIEDADES TECNOLÓGICAS EN HARINAS DE CEREALES, LEGUMINOSAS Y TUBÉRCULOS..... 618

DISEÑO Y EVALUACIÓN FUNCIONAL DE COMUNIDADES SINTÉTICAS BACTERIANAS CON PROPIEDADES PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL 623

PROTOCOLO MODIFICADO DE TRIZOL® PARA LA EXTRACCIÓN DE ARN TOTAL EN TEJIDOS DE CHILE 633

¿QUÉ BUSCAN LOS CONSUMIDORES EN UN ADEREZO? EVIDENCIA PARA EL DESARROLLO DE PRODUCTOS SALUDABLES 638

DESARROLLO DE NANOMATERIALES DE ZnO Y ZnO-rGO MEDIANTE SÍNTESIS VERDE CON *Psittacanthus Calyculatus* Y ANÁLISIS DE SU ACTIVIDAD BIOACTIVA 650

APROVECHAMIENTO DE SUERO DE LECHE FRESCO PARA LA MEJORA NUTRICIONAL Y SENSORIAL DE PRODUCTOS DE PANADERÍA 659

BIOSÍNTESIS VERDE Y EVALUACIÓN ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA OBTENIDAS A PARTIR DE EXTRACTO DE *Chlorella Vulgaris* 664

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL NURITE (*Clinopodium Macrostemum*) EN EXTRACTOS OBTENIDOS MEDIANTE ULTRASONIDO 671

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, PROXIMAL Y ANTIOXIDANTE DE ADEREZOS DE ARÁNDANO 680

DISEÑO MOLECULAR DE UNA CEPA DE *Bacillus Subtilis* PARA LA SOBREPRODUCCIÓN DE OXIDORREDUCTASAS QUE DEGRADAN CONTAMINANTES CARCINOGÉNICOS 690

PROTOCOLO PARA LA PUNCION SANGUINEA EN VENA BRANQUIAL DE *Ambystoma Mexicanum* BAJO CUIDADO PROFESIONAL 700

TRATAMIENTO SOSTENIBLE DE LACTOSUERO MEDIANTE *Geobacter Sulfurreducens* EN UN SISTEMA TIPO CELDA MICROBIANA 706

POTENCIAL DE BACTERIAS NATIVAS DE JALES MINEROS PARA LA SOLUBILIZACIÓN DE FOSFATO 711

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL FUNGISTÁTICO DE DESTILADOS ACUOSOS VEGETALES COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE CONTRA *Botrytis Sp* 717

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN BIODIGESTOR ALIMENTADO DE DESECHOS ORGÁNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS 722

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A BACTERICIDAS EN EL ESTABLECIMIENTO IN VITRO DE AGUACATE 'DUKE 7' 731

RESPUESTA DE LA GERMINACIÓN DE TOMATE AL SUMINISTRO DE CERIO (Ce) BAJO CONDICIONES DE SALINIDAD 735

BIOESTIMULACIÓN CON LUZ LED (AZUL, ROJA Y AZUL + ROJA) Y SU IMPACTO EN EL CONTENIDO DE ALCALOIDES DE *Ruta Chalepensis* 742

EFECTO DEL TITANIO EN PARÁMETROS DE CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE CAÑA DE AZÚCAR 747

LIBERACIÓN DE BIOPÉPTIDOS DERIVADOS DE LA SEMILLA DE CHÍA MEDIANTE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA Y EVALUACIÓN DE SU ACTIVIDAD EN RATONES CON DIABETES TIPO 2 INDUCIDA 751

PROTEÍNAS DEL HONGO COMESTIBLE (*Lactarius Indigo*) COMO POTENCIAL FUENTE DE PÉPTIDOS ANTIHIPERTENSIVOS: ANÁLISIS *IN SILICO* 756

CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE *Microbacterium Maritypicum* CON RELEVANCIA AMBIENTAL 766

SOLUCIÓN PRESERVANTE COMERCIAL EN LA VIDA EN FLORERO DE *Antirrhinum Majus* CV. POTOMAC CRIMSON 776

SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA PARA LA MITIGACIÓN DE PATÓGENOS BACTERIANOS EN LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA 781

EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA AGUDA DEL INSECTICIDA DINOTEFURÁN EN LA MICROALGA CLOROFÍCEA *Scenedesmus* Sp. 787

VALORIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE PTAR EN PRODUCTOS CERÁMICOS 793

EVALUACIÓN CFD DE GEOMETRÍAS DE IMPULSOR EN UN CRISOL TRONCOCÓNICO DE LABORATORIO PARA PROCESOS STIR-CASTING DE ALEACIONES DE ALUMINIO 802

MI CONTRIBUCIÓN A LA ECOLOGÍA DE UNGULADOS

Sonia Gallina Tessaro

Instituto de Ecología, A.C..
sonia.gallina@inecol.mx

Los ungulados son el grupo de animales que presentan pezuñas, y entre ellos están los venados. En México tenemos cuatro especies de venados: el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el venado bura (*O. hemionus*), el temazate rojo (*Mazama temama*) y el temazate gris (*O. pandora*).Los venados tienen como característica principal que los machos son de mayor tamaño que las hembras, presentan astas que mudan cada año y que están directamente relacionadas con la cantidad de testosterona. De hecho, generalmente se les caen en marzo y empiezan a desarrollarlas cubiertas de un terciopelo vascularizado, que permite su desarrollo, siendo en los meses de octubre-noviembre que ya tienen su cornamenta desarrollada (osificada) y entonces se les cae el terciopelo y quedan "limpias". El tamaño de las astas está relacionado con la edad, la calidad del hábitat (el alimento) y la genética, y tienen como función darle un estatus hacia los otros machos y para aparearse con las hembras que entran en celo. Las crías nacen después de 7 meses de gestación, con un pelaje moteado que les dura 3 meses y les proporciona un "camuflaje" para pasar desapercibidas por los depredadores. pueden ser una o dos las que nacen entre junio y agosto cuando ya están las lluvias y hay más alimento. La mayoría de los estudios para generar conocimiento de estos animales fueron realizados en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) que hay en México y que representan diferentes ecosistemas, debido a la seguridad de llevar a cabo investigaciones a largo plazo, y que las poblaciones de venados se encuentran mejor conservadas.

Venado Cola Blanca: se distribuye en todo el país con excepción de la península de Baja California (Fig.1) y es reconocido como la especie de fauna silvestre de mayor importancia desde la perspectiva del aprovechamiento cinegético (cacería deportiva) sobre todo en el Norte de México, como alimento de subsistencia en el Sureste del país, y con un alto valor cultural en las comunidades indígenas como los Yaqui, Seris, Huicholes, Mayas entre otras. Tiene 14 subespecies siendo *O.v. texanus* la que se encuentra en matorrales de los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, y la que deja una mayor derrama económica con la cacería deportiva (Fig.2). Las otras dos subespecies más aprovechadas son *O.v. couesi* en el Norte y *O.v. mexicanus* en el Centro del país.

Los primeros estudios de estos venados fueron realizados en la Reserva de la Biosfera La Michilía, al sur del estado de Durango que tiene una extensión aproximada de 35,000 ha, en un bosque templado de pino-encino, acerca de su dieta, ya que los ejidatarios querían saber si competían con su ganado vacuno. Para esto se utilizó una técnica microhistológica no invasiva que consiste en analizar los grupos fecales al microscopio después de una serie de pasos para obtener las preparaciones, ya que las epidermis de las plantas tienen características específicas en cuanto al tamaño, forma de las células y sus estructuras, que permanecen a lo largo del tracto digestivo y pueden identificarse en los grupos fecales. Para ello primero se tiene que hacer una colección de las epidermis de hojas de las plantas como material de referencia que puedan compararse en el microscopio. Se encontró que los venados son ramoneadores y consumen especies arbustivas y arbóreas que constituyen casi el 80% de su dieta, mientras que, para el ganado vacuno, son los pastos (más del 60% de su dieta), por lo que no son competidores.

En esa misma reserva durante 10 años se muestreó la población de venados mediante el conteo de los grupos fecales, pudiendo estimar la densidad y estructura poblacional. Este método se fue mejorando para poder ser aplicado en otros sitios con diferentes ecosistemas.

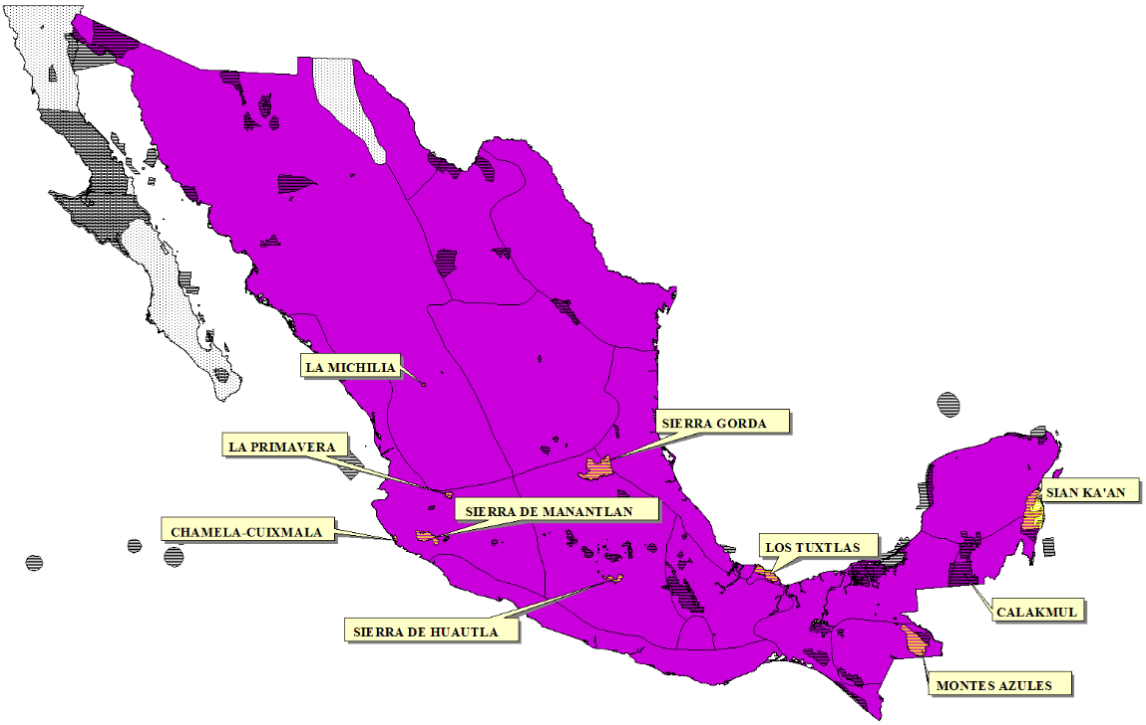


Fig. 1 Distribución histórica de venado cola blanca en las ANP´s (las reservas señaladas son donde se han realizado investigaciones de esta especie).

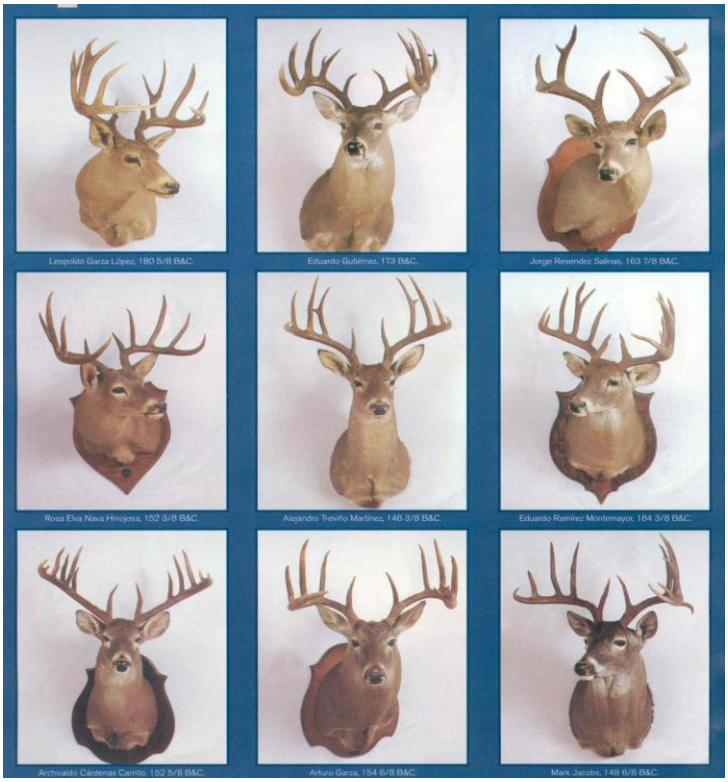


Fig. 2: Trofeos del venado cola blanca texano (*O.v. texanus*) cuyos machos tienen las astas más desarrolladas debido a que su hábitat principal son los matorrales desérticos.

Venado Bura: se distribuye en el Noroeste de México, con 6 subespecies, principalmente en la Península de Baja California donde hay 2 subespecies (O.h. fuliginatus al norte y O.h. peninsulae al sur) incluyendo dos islas: Isla Cedros (O.h. cerrosensis) en el Pacífico y la Isla Tiburón (O.h. sheldoni) en el Golfo de California. En Sonora hay otra subespecie (O.h eremicus. y en el Desierto Chihuahuense existe otra O.h. crooki. Esta última ha sido muy estudiada desde finales del siglo pasado en la Reserva de la Biosfera de Mapimí que tiene una superficie aproximada de 350,000 ha. (Fig. 3)

Se conoce su dinámica poblacional mediante un monitoreo de aproximadamente 30 años, estimando su densidad (que varía entre 1 y 4 venados/km^2) y estructura poblacional a través del conteo de grupos fecales y de la morfometría de los pellets (ya que son "bolitas" como las de cabras y borregos, y de acuerdo con sus medidas de largo y ancho tomadas con la ayuda de un vernier o pie de rey, podemos reconocer si pertenece a un macho, a una hembra o a un juvenil).

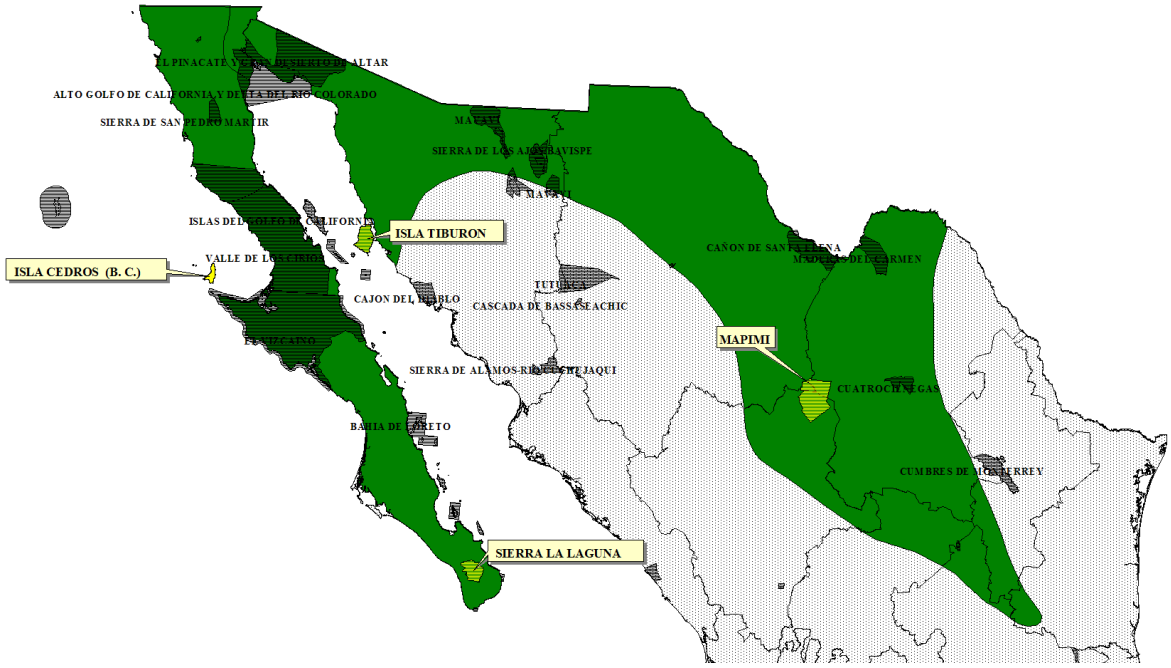


Fig. 3 Distribución del venado bura y ANP donde hay investigaciones.

A la vez se han hecho estudios de su hábitat, considerando las características de la vegetación que le proporcionan alimento y refugio, y como utiliza las diferentes asociaciones vegetales en estos matorrales xerófilos del Desierto Chihuahuense. Para conocer su área de actividad así como sus patrones diarios de comportamiento (haciendo ciclos continuos de 24 h) utilizamos radiotelemetría, para lo cual se capturaron 9 hembras mediante una red de caída para poderles poder ponerles collares que emiten una señal con una frecuencia específica que nos permiten identificar cada individuo, usando unos receptores y antenas fijas en dos sitios diferentes para poder triangular y saber si el animal está echado, alimentándose o desplazándose. A su vez se tomaban datos de temperatura y humedad para conocer como influyen en su conducta.

Se encontró que las venadas dedican la mayor parte del tiempo a descansar (64 %), seguido de pautas como caminar (en movimiento, 21 %) y la menor cantidad de tiempo es dedicada a estar detenidas alimentándose (15 %). La alimentación y los movimientos de las hembras de venado bura son realizados principalmente en horas crepusculares (al amanecer y atardecer, Fig. 4) cuando la temperatura ambiental no es tan alta. Considerando las altas temperaturas que predominan en el

sitio, el permanecer echadas la mayor parte del día puede ser necesario para una adecuada termorregulación.

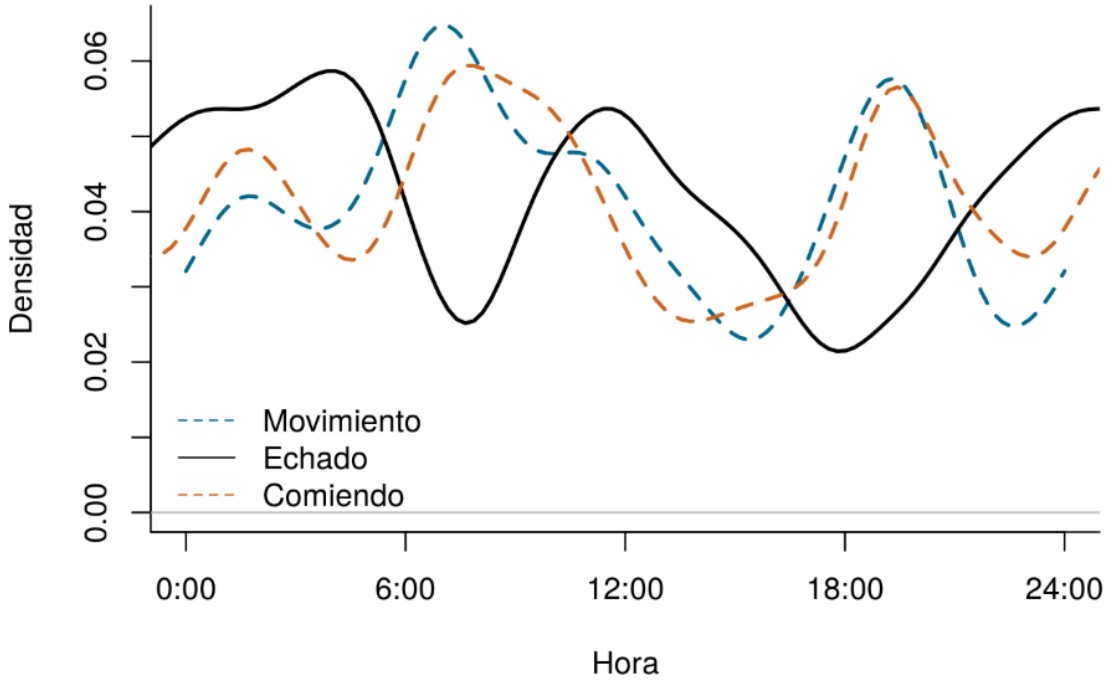


Fig. 4 Patrón de actividad diario de hembras de venado bura en el Desierto Chihuahuense, de la RB Mapimí, México (tomado de Pérez y Gallina 2019).

Venado Temazate Rojo: Se distribuye desde el sur de Tamaulipas hasta la península de Yucatán. Se ha observado que el venado temazate prefiere sitios con árboles maduros, en el bosque mesófilo de montaña o de niebla y selvas altas, puede considerarse como un especialista de hábitat y prefiere los sitios más conservados y arbolados, incluso ha sido considerado como indicador de ambientes conservados. Se alimenta principalmente de frutos. La estimación de su densidad poblacional es muy baja, menos de un venado por km^2, y es importante en comunidades rurales que lo cazan para ser utilizado como alimento de subsistencia. Existen estudios sobre ecología espacial y genética poblacional. Los sitios que usa como echaderos tienen buena cobertura de la vegetación que le proporciona protección contra los depredadores y se encuentran en lugares con fuerte pendiente.

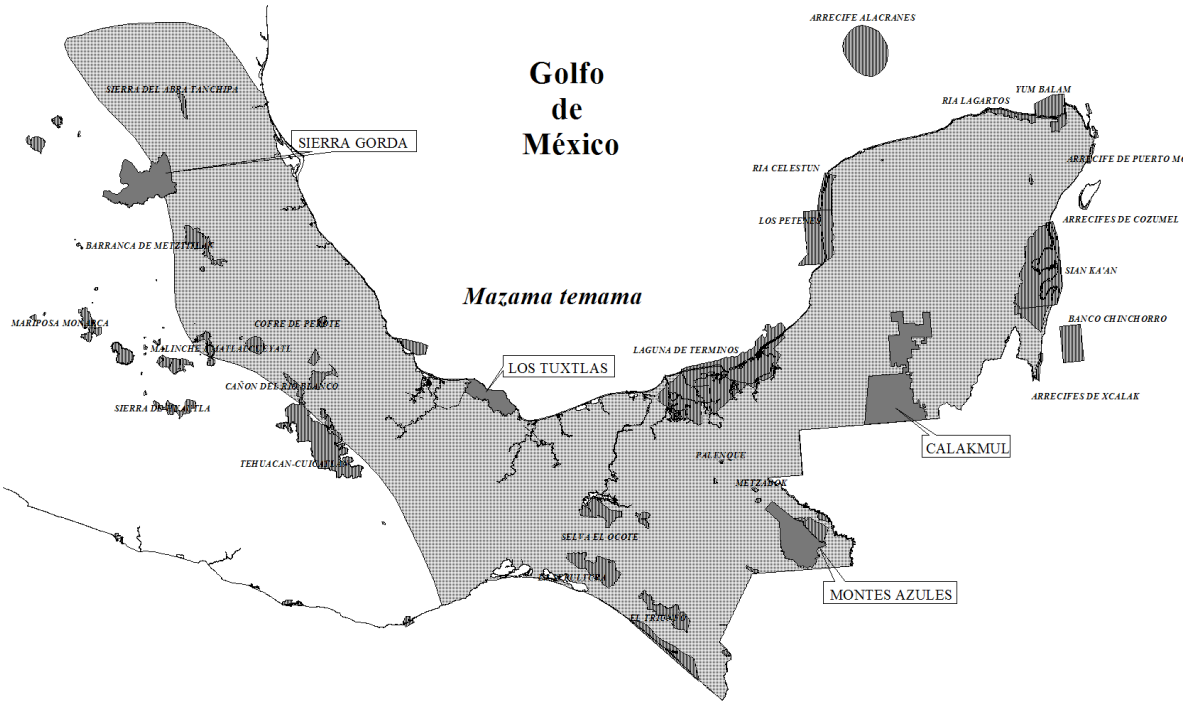


Fig. 5 Distribución del temazate rojo y en las ANP donde se ha estudiado.

Venado Temazate Gris: Se distribuye en la Península de Yucatán y es la especie de venado menos estudiada. Recientemente mediante estudios genéticos se le cambió el género de la especie de *Mazama pandora* a *Odocoileus pandora* por estar más relacionado con el venado bura. Apenas recientemente gracias a las cámaras trampa se está obteniendo información acerca del uso del hábitat y de los patrones de actividad en Quintana Roo (Fig. 6).

Aprovechamiento de la Vida Silvestre: Con el propósito de contribuir a compatibilizar y a reforzar la conservación de la biodiversidad con las necesidades de producción y desarrollo socioeconómico de México, en el sector rural, se estableció en 1997 el Sistema de Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (SUMA) promovido por la Dirección General de Vida Silvestre de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Las Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMAs) son predios e instalaciones que se dedican al aprovechamiento sustentable de las especies silvestres. Las UMAs de Vida Libre o Extensivas tienen como objetivo principal conservar la biodiversidad y el hábitat natural de las especies silvestres en áreas extensas mientras que las UMA Intensivas son criaderos para reproducir especies en cautiverio (Intensivas: PIMVS=Predios o Instalaciones que Manejan Vida Silvestre). En 2023, DGVS-SEMARNAT reportó 14,546 UMA cubriendo aproximadamente 39 millones de ha, lo que equivale a casi el 20% del territorio nacional.

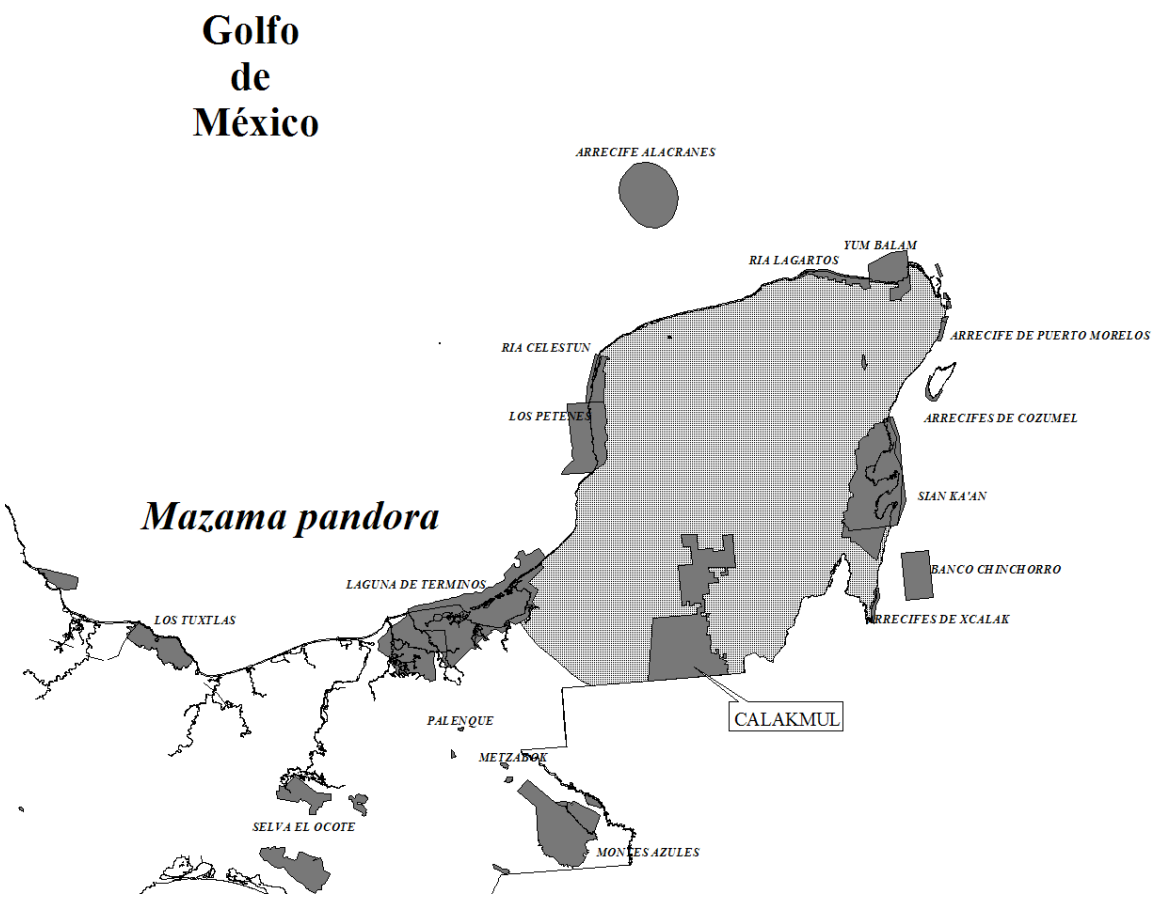
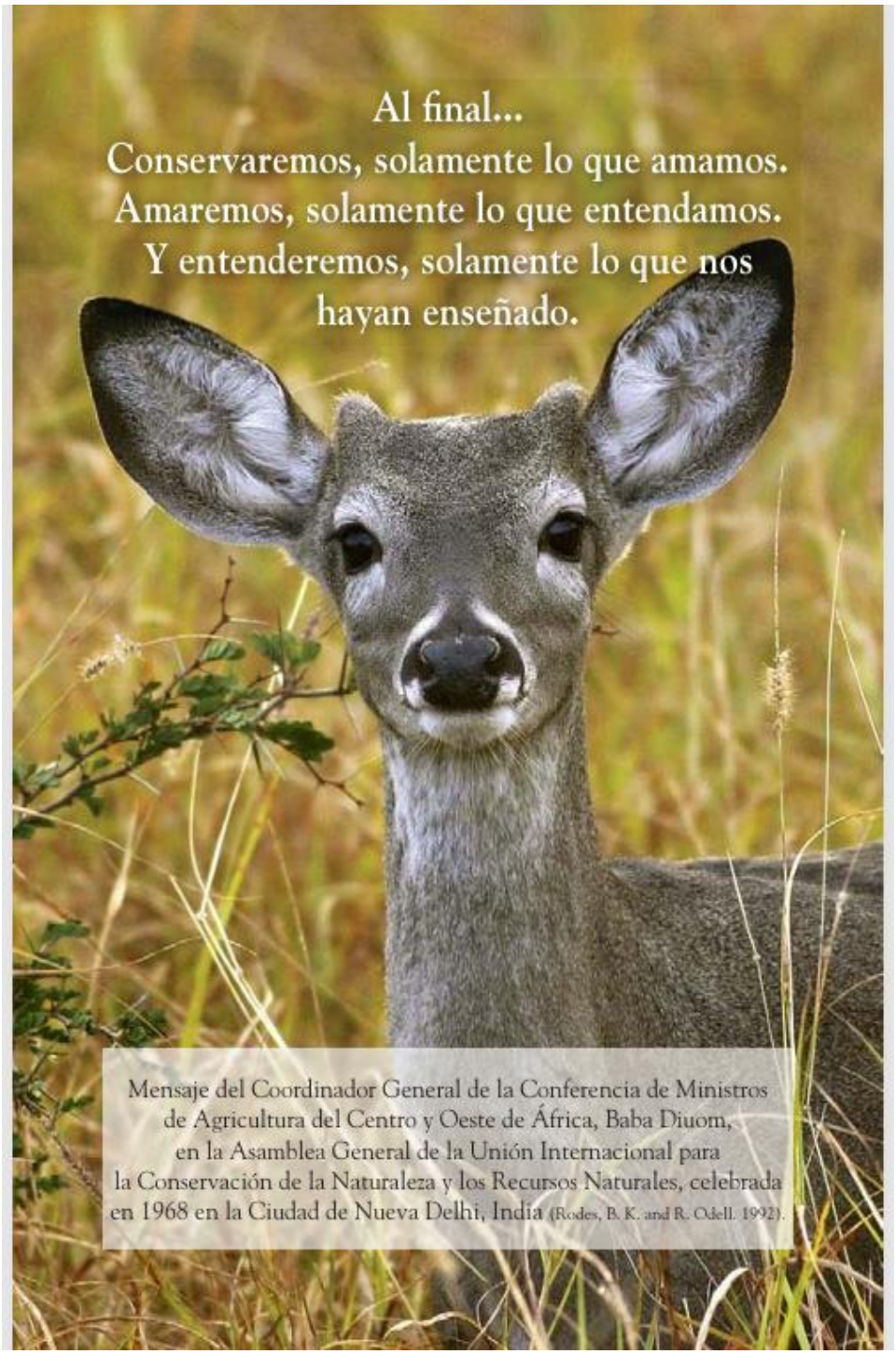


Fig. 6 Distribución del temazate gris y en las ANP donde se ha estudiado.

BIBLIOGRAFÍA

1. B. Muñoz, y S. Gallina. “Influence of habitat fragmentation on abundance of *Mazama temama* at different scales in the cloud forest”. Therya 7, 2016, pp. 77–87.
2. G. Sanchez-Rojas, S. Gallina y M. Equihua. “Pellet Morphometry as tool to distinguish age and sex in the mule deer”. Zoo-Biology 23, 2004, pp.139-146.
3. L. Pérez-Solano, L. García-Feria, S. Gallina-Tessaro. “Factors affecting the selection of and displacement within core areas by female mule deer (*Odocoileus hemionus*) in the Chihuahuan Desert, Mexico”. Mammalian Biology. Vol. 87, 2017, pp. 152-159
4. R. Reyna-Hurtado, y G. W. Tanner,”Habitat preferences of ungulates in hunted and nonhunted areas in the Calakmul Forest, Campeche, Mexico”. Biotropica Vol. 37, 2005, pp. 676–685.
5. S. Gallina-Tessaro (Ed). *Ecology and Conservation of Tropical Ungulates in Latin America.* (Springer, Switzerland, 2019).
6. S. Gallina-Tessaro, L. A. Pérez-Solano, R. Reyna-Hurtado, L. A. Escobedo-Morales, B. Muñoz-Vázquez, F. Marcos Contreras-Moreno, S. Mandujano, “Central American Red Brocket Deer *Mazama temama* (Kerr, 1792)” in *Deer of The World* (Springer Nature, Switzerland, 2025), Chapter46, pp. 605-619.


Al final...
Conservaremos, solamente lo que amamos.
Amaremos, solamente lo que entendamos.
Y entenderemos, solamente lo que nos hayan enseñado.
Mensaje del Coordinador General de la Conferencia de Ministros de Agricultura del Centro y Oeste de África, Baba Diuom, en la Asamblea General de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales, celebrada en 1968 en la Ciudad de Nueva Delhi, India (Rodes, B. K. and R. Odell. 1992).

CONTROL FITOSANITARIO DE *Fusarium* Spp. MEDIANTE TERAPIA FOTODINÁMICA CON ROSA DE BENGALA

Juan Carlos Ramírez Granados, Blanca E. Gómez Luna y Jorge Daniel Zepeda Quintana

Departamento de Ingenierías, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías,
Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra.
jcramirez@ugto.mx

RESUMEN

La población mundial actual es cercana a los 8300 millones de individuos. Este gran número de personas requiere un suministro constante de alimentos que proviene principalmente de la agricultura de manera directa o indirecta. Sin embargo, lograr que los cultivos tengan alta productividad es un gran reto, ya que suelen ser afectados por suelos con insuficiencia de nutrientes, climas adversos, insectos y agentes patógenos que disminuyen su calidad y rendimiento. Uno de los microorganismos con mayor afectación a los cultivos alrededor del mundo es el hongo *Fusarium* spp., llegando incluso a acabar con cosechas enteras. Este fitopatógeno es capaz de proliferar en casi cualquier región, infectando a una amplia variedad de plantas, generando severas pérdidas para los agricultores y reduciendo la disponibilidad de alimentos. En este trabajo se propone el uso de la terapia fotodinámica como un método alternativo para el control de *Fusarium* spp. La terapia fotodinámica consiste en el uso de un fotosensibilizador que es absorbido de manera selectiva por los microorganismos patógenos o células que se desean eliminar. El fotosensibilizador es inofensivo, pero al ser irradiado en la longitud de onda apropiada, y en presencia de oxígeno, genera especies reactivas que causan la apoptosis o necrosis del agente patógeno. Aquí se diseñaron y aplicaron varios tratamientos de terapia fotodinámica a muestras de *Fusarium* spp. empleando rosa de bengala como fotosensibilizador para evaluar su efectividad en el control de este hongo. Para esto, se prepararon soluciones con agua estéril o medio de cultivo de papa y dextrosa que posteriormente fueron inoculadas con *Fusarium* spp. A las soluciones inoculadas se les agregó una solución acuosa con rosa de bengala al 1%. Estas soluciones fueron iluminadas durante 100 horas continuas con una lámpara que posee emisión máxima a 540 nm e irradiancia de 40 W/m^2, la cual fue colocada a 10 cm de distancia. Durante los experimentos se midió la absorbancia de las soluciones a 600 nm para evaluar el crecimiento de la biomasa y la efectividad de cada tratamiento. Los resultados revelaron que la absorbancia de las soluciones tratadas con terapia fotodinámica y rosa de bengala fue prácticamente nula durante los experimentos, a diferencia de las soluciones no tratadas en donde la absorbancia aumentó significativamente debido al crecimiento logarítmico del hongo. Lo anterior indica que estos tratamientos de terapia fotodinámica impidieron el crecimiento del microorganismo patógeno. Al impedir el crecimiento de *Fusarium* spp. se podría evitar que las plantas desarrollen enfermedades asociadas a este hongo, contribuyendo a la producción de cultivos con mayor calidad y rendimiento.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades causadas por microorganismos fitopatógenos representan una amenaza importante para la agricultura. Estas enfermedades pueden afectar al desarrollo de las plantas e incluso pueden acabar con cultivos enteros como en los casos del plátano o la fresa, Fig. 1.



Fig. 1. a) Fresa infectada con *Fusarium* spp. y b) hongo aislado.

Tradicionalmente, el control de microorganismos fitopatógenos tales como bacterias y hongos se realiza mediante agroquímicos que, aunque efectivos, pueden generar residuos tóxicos para las personas y animales, contaminación ambiental y patógenos resistentes cuando son aplicados de manera incorrecta.[1]

Por otra parte, la terapia fotodinámica es un método de control alternativo que ha mostrado efectividad en la inhibición de microorganismos patógenos y que es más segura para las personas, animales y plantas debido a su selectividad, acción local y reducción del riesgo de inducir resistencia al tratamiento.[2]

En este trabajo se evalúa el efecto antifúngico de la terapia fotodinámica con rosa de bengala para el control *Fusarium* spp. *in vitro*. Lo anterior debido a que *Fusarium* spp. es un grupo de hongos fitopatógenos de gran preocupación en la agricultura por su capacidad para infectar a una amplia variedad de plantas y frutas, especialmente cuando sufren un desequilibrio; y por su capacidad de propagarse a través del aire, agua, suelo y por contacto con especímenes infectados. Usualmente, este fitopatógeno suele atacar a los conductos de xilema provocando su bloqueo y la marchitez de la planta. Además, las esporas de estos hongos pueden permanecer en el suelo en espera de un huésped durante años.[3,4]

TERAPIA FOTODINÁMICA

La terapia fotodinámica consiste en la aplicación de una sustancia inocua llamada fotosensibilizante sobre un organismo infectado. El fotosensibilizante se adhiere de manera selectiva a los patógenos por su afinidad, como en el caso de los fotosensibilizadores catiónicos que se unen a las células patógenas por diferencia de cargas eléctricas. Luego, cuando el fotosensibilizante es irradiado en una de sus bandas de absorción, y en presencia de oxígeno, pasa a un estado excitado y forma radicales libres que atacan a la membrana celular de los patógenos provocando muerte celular por apoptosis o necrosis, Fig. 2.[5,6]

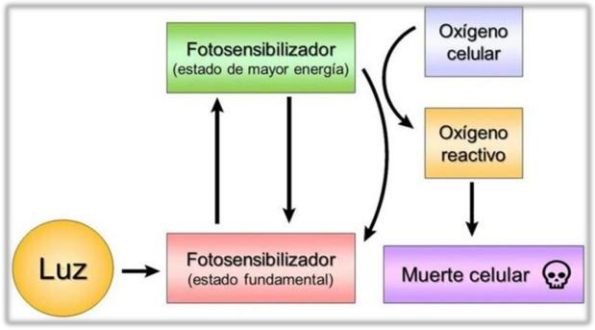


Fig. 2. Etapas de la terapia fotodinámica.

Los fotosensibilizadores son sustancias orgánicas e inorgánicas que se han ido perfeccionando con el paso del tiempo desde sus orígenes hasta los productos de 3ra o 4ta generación actuales que son

más efectivos y seguros. Según su mecanismo de acción se clasifican en dos grupos: no-fotodinámicos y fotodinámicos.

Fotorreacciones tipo I
Los fotosensibilizadores no-fotodinámicos pasan a estados excitados por acción de la radiación luminosa y se unen al ADN. Este proceso interrumpe la replicación del ADN; así como la síntesis de ARN y proteínas. Las principales desventajas de estos tratamientos son que pueden ocasionar daños oncológicos y mutaciones si son usados por largos periodos de tiempo.

Fotorreacciones tipo II
Los fotosensibilizadores fotodinámicos usan radiación luminosa y oxígeno molecular para generar especies reactivas de oxígeno, tales como el anión superóxido (O_2^-) y el oxígeno singlete ($^1O_2$). La primera etapa de este tipo de reacciones es la absorción de radiación ultravioleta o visible. Luego, las moléculas del fotosensibilizador pasan del estado fundamental a un estado energético excitado que reacciona con el oxígeno molecular para formar radicales O_2^- u $^1O_2$. Ambas especies reactivas de oxígeno atacan a los ácidos grasos insaturados que conforman a las membranas celulares, cuya peroxidación lipídica da lugar a la formación de hidroperóxidos alílicos. De esta manera, se inician procesos que causan la lisis de las membranas celulares de los patógenos, y posteriormente ocasionan su muerte.

En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos para aplicar la terapia fotodinámica al control de microorganismos patógenos en personas, animales y plantas a través de fotorreacciones tipo II, debido a que ofrecen beneficios significativos como su acción selectiva, local y de corta duración.[7]

PARTE EXPERIMENTAL

Para este estudio se cultivaron muestras de *Fusarium* spp. *in vitro* que fueron usadas para inocular 4 soluciones con 250 ml de medio de cultivo de papa-dextrosa (*PD*) y 4 soluciones con 250 ml de agua estéril. Inmediatamente después de inocular las soluciones se iniciaron los tratamientos de terapia fotodinámica. Los tratamientos aplicados a las soluciones fueron los siguientes: sin fotosensibilizador ni luz (*C*), sólo luz (*L*), sólo fotosensibilizador (*F*), fotosensibilizador y luz (*FL*).

También se prepararon 100 mL una solución acuosa con rosa de bengala al 1% como fotosensibilizador. Se añadieron 0.5 mL/100 mL a las soluciones inoculadas que requerían fotosensibilizador. Luego, las soluciones fueron irradiadas a 540 nm durante 100 horas sin interrupción utilizando una lámpara de 40 W/m^2 de irradiancia que fue colocada a 10 cm de distancia. El efecto antifúngico de los tratamientos fue evaluado a través la densidad óptica de las soluciones medida a 600 nm. Un incremento en la densidad óptica de las soluciones está asociado al crecimiento del hongo. En la Fig. 3 se presenta la metodología empleada para evaluar el efecto antifúngico de estos tratamientos para el control del *Fusarium* spp.

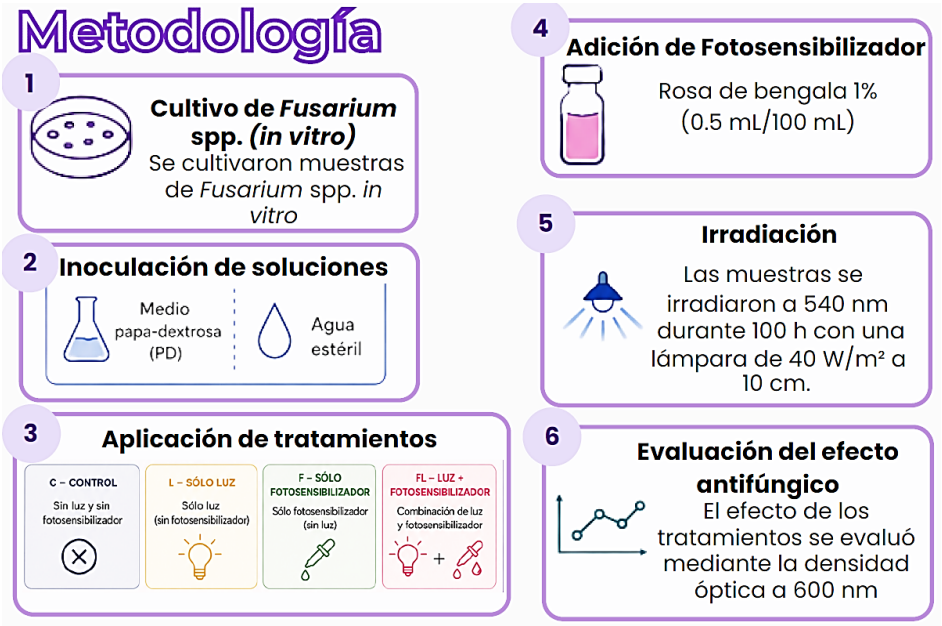


Fig. 3. Metodología para la evaluación del efecto antifúngico de los tratamientos de terapia fotodinámica empleados para el control de *Fusarium* spp.

RESULTADOS

Después de aplicar los tratamientos de terapia fotodinámica a las soluciones inoculadas con *Fusarium* spp. se obtuvieron los siguientes resultados.

En los tratamientos *C* (tratamientos de control) se observó un rápido aumento en la densidad óptica de las soluciones con respecto al tiempo. Este incremento en la densidad óptica está asociado con el crecimiento logarítmico del hongo, Fig. 4.

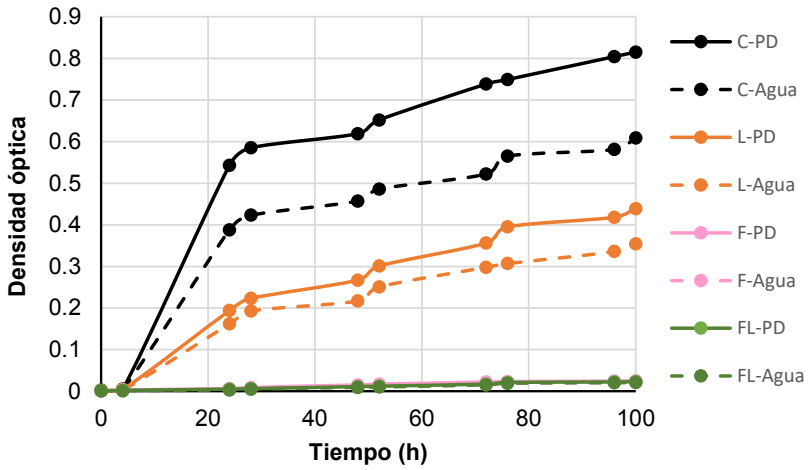


Fig. 4. Densidad óptica de las soluciones inoculadas con *Fusarium* spp. y tratadas con terapia fotodinámica y rosa de bengala.

Por su parte, en los tratamientos *L* (sólo con luz) se observó un incremento menor en la densidad óptica de las soluciones y el crecimiento del hongo en comparación con los controles. Aunque estos tratamientos inhibieron el crecimiento del hongo, no lograron detenerlo por completo debido a la insuficiencia de especies reactivas de oxígeno derivada de la ausencia del fotosensibilizador.

Por otra parte, los tratamientos *F* (sólo con fotosensibilizador) y *FL* (con radiación luminosa y fotosensibilizador) fueron los más efectivos contra *Fusarium* spp. De hecho, el efecto antifúngico de estos tratamientos de terapia fotodinámica fue similar. En ambos casos prácticamente no aumentó la densidad óptica de las soluciones durante las 100 horas de los experimentos debido a la inhibición total del crecimiento del hongo.

Finalmente, cabe mencionar que en todas las soluciones con medio de cultivo *PD,* la densidad óptica y el crecimiento del hongo fue mayor que en las soluciones con agua debido a una mayor disponibilidad de nutrientes.

CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñaron y aplicaron tratamientos de terapia fotodinámica con rosa de bengala a soluciones inoculadas con *Fusarium* spp. con la finalidad de evaluar su efecto antifúngico. En los resultados se encontró que los tratamientos tipo *F* (con fotosensibilizador y sin radiación luminosa) y *FL* (con fotosensibilizador y radiación luminosa) fueron los más efectivos, ya que prácticamente impidieron la proliferación del hongo. De hecho, los tratamientos *F* evitaron el crecimiento del hongo incluso sin radiación luminosa; lo que indica que el rosa de bengala contiene especies reactivas naturales que inactivan al hongo. Esto contribuye a la robustes de los tratamientos *F* y *FL* dado que serían efectivos incluso en días nublados o durante la noche. Sin embargo, es importante considerar que la efectividad de los tratamientos también depende del tipo de microorganismo que se desea erradicar, su estructura, procesos de división celular y resistencia. Así pues, estos hallazgos confirman que la terapia fotodinámica posee un gran potencial para el control de microorganismos fitopatógenos y representa una alternativa viable para sustituir o complementar a los fungicidas químicos tradicionales; además de reducir los riesgos a la salud alimentaria de las personas y al ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. M. E. Bibián-León, J. Barrios-González, H. Vibrans, & C. Trejo, “Hongos fitopatógenos asociados a malezas: una fuente para el desarrollo de bioherbicidas”, Agro-Divulgación, Vol. 4, 6, 2024.
2. T. Dai, Y. Y. Huang & M. R. Hamblin, “Photodynamic therapy for localized infections—state of the art”, Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, Vol. 6, 3-4, 2012, pp. 170–188.
3. N. Agrios, *Fitopatología*, (Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, México, D. F. 1998). 2da edición, p. 83.
4. Michielse C. & Rep M., “Pathogen profile update: *Fusarium oxysporum*”, Molecular Plant Pathology, Vol. 10, 3, 2009, pp. 311-324.
5. C. Aspiroz, B. F. Cebamanos, A. Rezusta, P. Paz-Cristóbal, F. Domínguez-Luzón, J. G. Díaz, & Y. Gilaberte, “Terapia fotodinámica aplicada al tratamiento de las onicomicosis. Presentación de un caso y revisión de la literatura”, Revista Iberoamericana de Micología, 28, 4, 2011, pp. 191-193.
6. L. Comini & S. Núñez Montoya, “Fotosensibilizadores naturales activos en terapia fotodinámica”, Bitacora Digital, 3, 7, 2016.
7. E. S. Nyman & P. H. Hynninen, “Research advances in the use of tetrapyrrolic photosensitizers for photodynamic therapy”, J. Photochem. Photobiol. B Biol., 73, 2004, pp. 1–28.

GRANA COCHINILLA USADA EN EL TEÑIDO DE PIELES DE CONEJO TRATADAS CON CURTIENTES NATURALES

Gabriela Arroyo Figueroa, David Elguera Reséndiz, Tarsicio Medina Saavedra, Xitlaly Luna Bautista, Lilia Mexicano Santoyo

Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra. Departamento de Ingeniería Agroindustrial
g.arroyo@ugto.mx

RESUMEN

El curtido generalmente se realiza con productos químicos que pueden ser nocivos para el ser humano. Por lo que se precisa de encontrar una forma de curtido natural que permita obtener una piel con buenas características para su manejo. Por lo que el objetivo de este trabajo fue comparar el uso de tres curtientes naturales, y posteriormente realizar el teñido de pieles con el colorante natural, grana Cochinilla. La metodología consistió en emplear tres curtientes naturales aplicados en pieles de conejo con tres repeticiones cada una, los cuales fueron: alumbre, corteza de fresno (*Fraxinus uhdei*), y semilla de tabachín (*Delonix regia*). las pieles fueron seleccionados, lavadas, cortadas, y sometidas al método de reverdecimiento y descarnado. Posteriormente, fueron lavadas, secadas, estiradas y teñidas con grana cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa). Los resultados mostraron que las pieles curtidas con alumbre resultaron más claras (L*=93.47 ±0.39) en comparación con los otros curtientes, corteza de fresno (L* =92.00±0.56) y semilla de tabachín (L*=90.65±1.62). Las pieles curtidas con corteza de fresno mostraron ser las mejores en términos de suavidad y un pH de 5.15, el cual es ideal para mantener la integridad proteica del colágeno. Las pieles curtidas con semilla de tabachín le siguen en calidad, y finalmente, las curtidas con alumbre, que presentaron mayor rigidez y un pH más ácido de 3.46, lo que podría afectar su durabilidad. En cuanto al teñido se observó dependencia del color con respecto al curtiente. Se concluyó que el tipo de curtiente afecta significativamente la textura, el color de las pieles teñidas y el pH de las pieles curtidas. Se destaca la importancia de un buen manejo de las pieles desde el inicio del proceso para obtener resultados óptimos**.**

Palabras clave: Curtido, teñido, conejo

INTRODUCCIÓN

La industria del cuero es una de las más antiguas y estables en la economía mundial destacándose por transformar materias primas en productos valiosos y duraderos, aunque enfrenta problemas en cuanto a los residuos que esta pudiera generar (Noboa *et al.,* 2025), en la actualidad se ha buscado constantemente mejorar la calidad y durabilidad de sus productos, manteniendo al mismo tiempo prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Huamani, 2024). Entre los tintes más producidos y usados en la época prehispánica estaban los pigmentos rojos, que comúnmente eran de origen vegetal (como el palo de campeche, el palo de Brasil y el achiote) o mineral (como el cinabrio y la hematita); pero el más cotizado y exportado por su coloración y valor en el teñido provenía de un insecto; la grana cochinilla (López, 2021).El teñido de las pieles con grana cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa), colorante natural obtenido del ácido carmínico proveniente del insecto (Arroyo *et al.,* 2021), siendo muy utilizado por sus múltiples usos en la tinción de fibras naturales, ofreciendo así una alternativa natural a los colorantes sintéticos dominantes en este caso en la industria y artesanías del cuero (Huamani, 2024).

Por otro lado, el curtido es el tratamiento de las pieles de los animales para convertirlas en cuero, y se puede realizar con diferentes agentes químicos; así como con curtientes vegetales, que son sustancias extraídas de plantas, el proceso de curtido convencional es ampliamente utilizado en la producción de cuero en todo el mundo, implica el uso de cromo como agente de curtido (Chapalbay, 2023). México, con su tradición ganadera y artesanal, ha desarrollado una industria del curtido

relevante, especialmente en regiones como León, Guanajuato. Vidaurri-Ramírez y Morgan-Beltrán, (2011); señalan que estos centros de curtido combinan la disponibilidad de materia prima, la experiencia artesanal y la modernización tecnológica, convirtiéndose en polos productivos que abastecen tanto al mercado nacional como al internacional. No obstante, la competitividad global exige que la industria cumpla con normativas ambientales y estándares de calidad, incorporando prácticas sostenibles y procesos de tratamiento de residuos que mitiguen su impacto ecológico. Sin embargo el curtido vegetal consiste en un proceso artesanal y ecológico, es una tradición antigua que se remonta a la prehistoria, nació cuando el hombre descubrió que las pieles en contacto con troncos, cortezas y hojas se conservaban mejor que las demás, como antecedentes se debe recalcar que este tipo de curtido transforma las pieles de animales en cuero resistente y duradero, utilizando taninos naturales que se extraen de plantas como el castaño, el quebracho, la tara, mimosa o el roble, etc. (Moran, 2024).

Para este trabajo se utilizaron tres curtientes diferentes, alumbre, taninos de corteza de fresno y taninos de semillas de tabachín. Por su parte los taninos son conocidos por su capacidad antioxidante, Son polímeros, constituidos principalmente por glucósidos, los cuales a su vez tienen como principal propiedad la capacidad de precipitar proteínas. Dichas características son fundamentales en la aplicación de la curtición de pieles, por lo que son importantes en la industria ya que son fáciles de obtener y con ellos se busca mitigar el impacto al ambiente (Palencia *et al.,* 2023).

Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de la grana cochinilla en el teñido de las pieles de conejo tratadas con curtientes naturales para ofrecer un panorama integral sobre el teñido y la curtiduría. Se destaca la importancia del teñido natural y de los curtientes vegetales como alternativa ecológica frente a los procesos convencionales y se resalta la necesidad de avanzar hacia prácticas más sostenibles que permitan preservar tanto el patrimonio artesanal como el medio ambiente.

PARTE EXPERIMENTAL

Teñido de las pieles de conejo con grana cochinilla

El proceso de teñido de pieles de conejo con grana cochinilla se llevó a cabo bajo condiciones controladas, siguiendo parámetros establecidos para asegurar una fijación adecuada del colorante natural. En primer lugar, se procedió al pesado individual de cada una de las pieles anteriormente curtidas con: alumbre, corteza de fresno y semilla del árbol de tabachín (tres repeticiones por cada curtiente). utilizando una balanza analítica. Con base en el peso de cada piel, se calculó el 30 % en peso de grana cochinilla (Rojas, 2004). La grana utilizada presentaba un tamaño de partícula de aproximadamente 0.0165 pulgadas, lo cual permite una mayor área de contacto y eficiencia en la extracción del pigmento. Posteriormente, se realizó la disolución del colorante. Para ello, se colocó la cantidad correspondiente de grana en un vaso de precipitados de 500 ml, al cual se añadieron 100 ml de agua potable (Figura 1.A). Esta mezcla se sometió a calentamiento utilizando una parrilla de calentamiento PC-600D marca CORNING, hasta alcanzar una temperatura constante de 85 °C durante 30 minutos (Figura 1.B). El calentamiento favorece la liberación de ácido carmínico, principal componente colorante de la grana. Al término del calentamiento, la solución fue dejada en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente (Figura 1.C). A continuación, se preparó la solución de teñido. En un recipiente plástico con capacidad de 20 litros se vertieron 2 L de agua potable, a los cuales se añadieron 2 ml de ácido acético glacial, actuando como agente acidulante para optimizar la afinidad del colorante con las fibras de colágeno de la piel. Seguidamente, se incorporó la solución colorante previamente obtenida, y se introdujo la piel a teñir. El baño de teñido fue mantenido a una temperatura constante de 40 °C durante 90 minutos, favoreciendo una fijación gradual del colorante. Una vez finalizado este periodo, las pieles fueron dejadas en reposo durante 48 horas para permitir una absorción completa del colorante y una distribución uniforme. Finalmente, las pieles teñidas fueron enjuagadas con agua potable a temperatura ambiente para eliminar el exceso de colorante no fijado (Figura 1.D), y se dejaron secar durante 24 horas en condiciones ambientales controladas.



Figura 1. Proceso de tinción con grana cochinilla de las pieles. (Autoría propia)

Pruebas realizadas a las pieles teñidas

pH de la solución: La prueba de pH se llevó a cabo con el potenciómetro HI 2211 marca HANNA para esto se cortó una parte de la piel de conejo para realizar la prueba, se pesó con ayuda de una balanza y se midió la cantidad de agua potable correspondiente, posteriormente una vez pesada la piel y medida el agua en un vaso de precipitado de 200 ml se colocó el agua y la piel y se dejó en remojo durante 10 min como se observa en la Figura 2.A, para finalmente con ayuda de un potenciómetro marca HANNA se realizó la medición del pH, introduciendo el electrodo en el agua en la que se encontraba la piel y se registró el valor.

Color: La prueba de color se realizó con el colorímetro CR 400 marca Minolta, se calibró el colorímetro, se colocó en el centro de la placa de calibración y se checo que aparecieran los valores que indica el manual, para así poder realizar la medición de color colocando las pieles en una superficie plana y se midió el color por la parte del pelo de las pieles curtidas y se registraron los valores de L*, a* y b*, como se muestra la Figura 2.B.

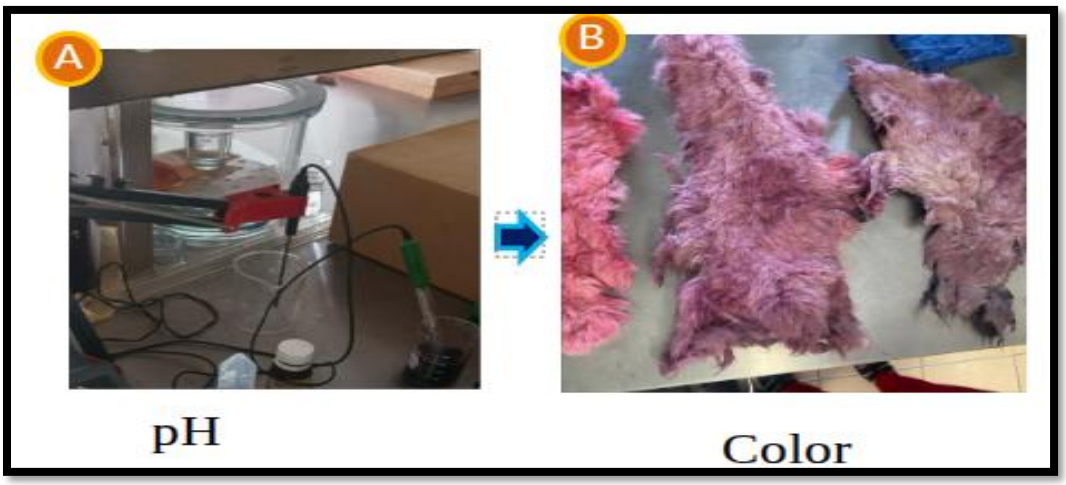


Figura 2. Pruebas realizadas a las pieles teñidas con grana cochinilla. (Autoría propia)

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas de pH de la solución de grana cochinilla y la prueba de color de las pieles.

En cuanto al pH la corteza de fresno y alumbre presentan valores de pH ácidos (4.7–5.0), lo que puede favorecer la fijación del colorante y estabilizar el colágeno de la piel. Por otra parte, la semilla de tabachín tiene un pH más neutro (6.26), influyendo en una menor intensidad de coloración o diferente tonalidad.

Respeto a el color las pieles curtidas con alumbre fueron las que mejor intensifican el color rojo y amarillo, y proporciona la mayor luminosidad, las pieles cutidas con la corteza de fresno genera un color más opaco, pero con una buena intensidad de rojo y las curtidas con semilla de tabachín, al tener un pH más neutro, produce tonos más oscuros y menos saturados en rojo y amarillo.

Tabla 1. Resultados de la prueba de pH de la solución del colorante y prueba de color a las pieles curtidas y teñidas.

Curtiente natural	pH (solución grana)	Color (pelo teñido)
Alumbre	4.95 ± 0.05	L* 66.64 ± 2.74 a* 25.07 ± 2.71 b* 4.31 ± 0.52
Corteza de fresno	4.71 ± 0.09	L* 58.25 ± 2.74 a* 20.03 ± 1.63 b* 0.94 ± 0.47
Semilla de tabachín	6.26 ± 0.06	L* 52.72 ± 8.26 a* 15.25 ± 2.28 b* 1.97 ± 1.07

Amaguaya, (2021); menciona que el pH es un factor que influencia el teñido, siendo recomendable medirlo al principio y final de la tintura para asegurar el pH y su compatibilidad con el tinte que será usado. Para fijar regularmente el tinte hay que tener el pH hasta 4 a 4.5, así se frena la afinidad y se consigue mayor igualación y uniformidad. Lo que coincide con los resultados obtenidos pues las pieles que fueron teñidas con la solución de pH entre 4.7 y 4.9, fueron las que tuvieron mayores valores en las coordenadas CIELab*.

CONCLUSIONES

Se concluye que el tipo de curtiente utilizado y el pH del baño de teñido con grana cochinilla, influye en el color obtenido en las pieles de conejo. Los valores de pH del baño de teñido mostraron variaciones entre los tratamientos, esto se ve reflejado en los valores de las coordenadas CIELab* encontradas en las pieles con los diferentes curtientes.

BIBLIOGRAFIA

1. Arroyo Figueroa, G., Casimiro Rodríguez, M. G., Rafael Martínez, P., Hernández Carrillo, N. J., Leal Sánchez, Y. G., & Montalvo García, F. (2021). Teñido con grana cochinilla: Solidez del color y expectativas de aplicación. JÓVENES EN LA CIENCIA, 10. Consultado: 25/08/2025. https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3278.
2. Amaguaya Colcha, A. F. (2021). Uso de la tintura orgánica en la curtición de pieles en la provincia de Chimborazo. Consultado: 01/09/2025. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15621.

3. Chapalbay Chavez, T. L. (2023). Comparación de curtientes vegetales en la obtención de cuero para calzado en pieles caprinas. Consultado: 27/08/2025. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/21152.
4. Huamani Navarro, L. N. (2024). Efecto del teñido de tinte de “cochinilla’’(Dactylopius coccus) y mordientes metálicos sobre las propiedades de colorimétricas, bandas químicas y de solidez de color en fibra de alpaca Huacaya (Vicugna pacos). Consultado: 25/08/2025. http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1492.
5. López, C. M. B. (2021). Grana cochinilla, la huella del rojo mexicano. *Espacio Diseño*, (292-293), 15-23. Consultado: 25/08/2025. https://espaciodisenoojs.xoc.uam.mx/index.php/espaciodiseno/article/view/2340.
6. Morán Cabezas, C. A. (2024). Curtición de pieles caprinas con la utilización de tres niveles de castaño (castanea sativa) para elaboración de calzado. Consultado: 27/08/2025. https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/22737.
7. Noboa, W. P. R., Muñoz, S. S. S., & Vargas, L. P. O. (2025). Gestión de Residuos de Curtiembres y Políticas de Sostenibilidad en la Industria del Cuero. *Tesla Revista Científica*, *5*(1), e474-e474. Consultado: 25/08/2025. https://doi.org/10.55204/trc.v5i1.e474.
8. Palencia Blanco, C. G; Paz Díaz, H.J; Porras Oliveros, J.T; Carreño Castaño, l. A; Salazar Beleño, A. M & Pacheco Valderrama, M. M**.** (2023). Evaluación del cuero obtenido a partir de piel de pescado de Cachama Negra (Colossoma macropomum) utilizando taninos extraídos del pseudotallo del plátano (Musa paradisiaca). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *21*(2), 115-129. Consultado: 26708/2025. https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2198.
9. Rojas (2004). Cunicultura, Curtido de Pieles de Conejo. Publicaciones SENA Regional Valle. Consultado: 26/08/2025. https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/7589?show=full.
10. Vidaurri-Ramírez, J. F., & Morgan-Beltrán, J. (2011). La sustentabilidad en la industria de la curtiduría y su relación con el entorno urbano. El caso de León, Guanajuato, México. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, (51), 25–32. https://doi.org/10.33064/iycuaa2011516814.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE *Agave Cupreata* Y SU RELACIÓN CON LA ALTITUD Y TIPO DE SUELO EN LA REGIÓN CENTRO DEL ESTADO DE GUERRERO

Abelardo Analco Hernández[1*], Javier Jiménez Hernández[1], Kelly Maribel Monja Mio[2], María Xochitl Astudillo Miller[3], Yanik Ixchel Maldonado Astudillo[1], Ricardo Salazar[4], Antonio Rescalvo Morales[2]

[1]Facultad de Ciencias Químico Biológicas,[2]Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, [3]Centro de Innovación, Competitividad y Sostenibilidad. Universidad Autónoma de Guerrero. [4]SECIHTI-Universidad Autónoma de Guerrero.
14885@uagro.mx

RESUMEN

El *Agave cupreata* es una de las especies de Agave que se encuentra en México y endémica del estado de Guerrero. El *A. cupreata* es una planta que suele ser cosechada de manera silvestre en el campo antes de su floración. Una vez que el agave alcanza su madurez y comienza su etapa de reproducción, la planta presenta rasgos morfológicos distintivos. El objetivo del presente trabajo fue analizar las características morfológicas del *A. cupreata* de acuerdo a la altitud y tipo de suelo de cuatro comunidades de la región Centro del Estado Guerrero. Se colectaron en el estudio 40 plántulas que cumplieran un año de edad libres de daño mecánico provenientes de cuatro comunidades de la región Centro del Estado de Guerrero (Plan de Guerrero, Mazatlán, Huiziltepec, Axaxacualco). Se midieron las siguientes características morfológicas como el tamaño de la plántula, roseta, número y longitud de la hoja, diámetro de la piña y longitud de la espina, utilizando instrumentos de medición (cinta métrica y regla graduada en mm). Se observaron diferencias significativas en cuanto al número de hojas, Ancho de la roseta y espina de la hoja, siendo mayores en la comunidad Mazatlán, comparado con las otras tres comunidades, con un valor de $p<0.05$. El número de hoja, longitud del tallo y longitud de la hoja fueron mayores en el tipo de suelo Regosol en comparación con el suelo Leptosol con un valor de $p>0.05$. También se observó una correlación negativa estadísticamente significativa de la espina de la hoja con la altitud ($r = -0.32$, $p = 0.010$). Se concluye que las características morfológicas del *A. cupreata* tienen un mejor desarrollo en el tipo de suelo Regosol y que la altitud se correlaciona negativamente con el desarrollo de la espina.

Palabras clave: *Agave cupreata*, tipo de suelo, altitud.

.

INTRODUCCIÓN

El género agave constituye uno de los recursos vegetales más representativos de las zonas áridas y semiáridas de México, debido a su alta distribución, diversidad biológica e importancia ecológica, económica y sociocultural. México es reconocido como el principal centro de origen y diversificación de los agaves, albergando aproximadamente el 75 % de las especies conocidas a nivel mundial.

Las poblaciones de *Agave cupreata (Trel. & A. Berger)* se desarrolla en ambientes heterogéneos caracterizados por variaciones significativas en altitud, clima, pendiente y propiedades edáficas. Estas condiciones ambientales ejercen una influencia directa sobre el crecimiento, desarrollo y expresión fenotípica de los individuos, generando diferencias morfológicas entre poblaciones que pueden reflejar procesos de adaptación local. La caracterización morfológica constituye una herramienta fundamental para evaluar dicha variabilidad, permitiendo identificar atributos relacionados con el tamaño de la planta, número y dimensiones de la hoja, arquitectura de la roseta, coloración y otras características de interés ecológico, agronómico y productivo.

Entre los factores ambientales que influyen en la variación fenotípica de las plantas, la altitud desempeña un papel relevante debido a su relación con cambios de temperaturas, precipitación, radiación solar y disponibilidad hídrica. Así mismo, las características físicas y químicas del suelo, tales como la textura, PH, contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes, condicionan el establecimiento, crecimiento y productividad de las especies vegetales. La interacción entre estos

factores puede favorecer la aparición de diferencias morfológicas que reflejan estrategias adaptativas específicas para cada ambiente.

En la región centro del estado de Guerrero, donde se localizan importantes poblaciones silvestres de *A. cupreata,* existe una creciente preocupación por la disminución de los recursos naturales derivada de la extracción intensiva de plantas para la industria mezcalera y por la limitada información científica disponible sobre la variabilidad morfológica de la especie y su relación con las condiciones ambientales. El conocimiento de esta variabilidad resulta indispensable para establecer criterios de conservación, selección de germoplasma y programas de propagación que contribuyan al aprovechamiento sostenible del recurso.

En este contexto, la caracterización morfológica de *A. cupreata* y el análisis de su relación con la altitud y el tipo de suelo representan una estrategia relevante para comprender los patrones de variación presentes en las poblaciones naturales de la región centro del estado de Guerrero.

El objetivo del presente trabajo fue “Analizar las características morfológicas del *A. cupreata* de acuerdo a la altitud y tipo de suelo de cuatro comunidades de la región Centro del Estado Guerrero”.

TEORÍA

Generalidades del Agave

El agave constituye una planta emblemática de México, obtenida tanto de poblaciones naturales (silvestres) como de plantaciones establecidas. El género agave representa el más grande de los nueve subgéneros que integran la familia *Asparagaceae;* México se reconoce como el principal centro de diversidad de estas plantas (Bermúdez Bazán et al., 2021; Plascencia de la Torre y Peralta Gordon, 2018).El *Agave cupreata* enfrenta un riesgo de desaparición a mediano plazo si no se asegura la incorporación y supervivencia de nuevos individuos. En las regiones de guerrero y Oaxaca. Se ha documentado una reducción en la diversidad genética de esta especie, fenómeno que podría intensificarse debido a la disminución del tamaño de las poblaciones y a la perdida de sus polinizadores naturales (Barrios Ayala et al., 2015).

El *Agave cupreata* es una planta que alcanza la madurez sexual entre 7 y 15 años y no se reproduce vegetativamente. Se distribuye en laderas de 1 220 a 1 850 m de altitud en la depresión del Balsas, región semiárida de los estados de Guerrero y Michoacán, al sur-occidente de México (Martínez Palacios et al., 2011).

Caracterización edafológica

Las especies pertenecientes al género Agave poseen una notable capacidad de adaptación fisiológica a una amplia variedad de condiciones edáficas. Estas plantas pueden establecerse en suelos con diferentes características fisicoquímicas y de diversos orígenes geológicos. Su desarrollo es posible tanto en terrenos ácidos y pedregosos de origen volcánico como en suelos alcalinos derivados de formaciones calcáreas de origen marino. Así mismo, algunas especies prosperan en ambientes con escasa disponibilidad de nutrientes, mientras que otras crecen adecuadamente en suelos ricos en minerales. De igual manera, presentan tolerancia a condiciones contrastantes de salinidad y a distintos niveles de acidez del suelo, lo que evidencia su amplia plasticidad ecológica (Cen Cen et al., 2015). Se estima que, a nivel mundial, más del 74 % de las áreas edáficas utilizadas para actividades agrícolas experimentan problemas derivados de la acumulación de sales en el suelo (Argentel Martínez et al., 2017).

Caracterización morfológica de Agave cupreata

Se han realizado evaluaciones directamente en campo sobre poblaciones silvestre y cultivadas de *Agave cupreata* donde se permite evidenciar la diversidad fenotípica que aún persiste en esta especie. La variabilidad que se ha observado se manifiesta principalmente en características relacionadas con la arquitectura y morfología de la planta, tales como el hábito de crecimiento, la altura de la roseta, la longitud del tallo, la forma de las hojas y de sus márgenes, el número de

costillas foliares, así como las dimensiones de las espinas terminales y marginales. Con estas diferencias se han establecido descriptores morfológicos con potencial para para distinguir distintos ecotipos de *A. cupreata.* De igual forma, este conocimiento representa una herramienta esencial para el reconocimiento y la protección legal de variedades o cultivares de uso tradicional, lo cual favorece la conservación de este recurso fitogenético endémico de México y promueve estrategias de manejo y aprovechamiento sustentable (Avendaño Arrazate et al., 2015).

PARTE EXPERIMENTAL

Origen de la muestra: Se colectaron para el estudio 40 plántulas que cumplieran un año de edad libres de daño mecánico, provenientes de cuatro comunidades de la región Centro del Estado de Guerrero. Las plántulas fueron trasladadas a la Unidad de Biotecnología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. sede en Acapulco, Gro. Posteriormente, los cuatro grupos se carcaterizaron morfológicamente mediante la medición de las siguientes variables: tamaño de la planta, tamaño de la roseta, número de hojas, longitud de la hoja, diámetro de la piña, longitud de espina y ancho de la piña. Con los datos obtenidos se elaboró una base de datos en el paquete estadístico STATA versión 14. para realizar el análisis estadístico de los resultados, se compararon medias por ANOVA de una vía, y la comparación entre los grupos de estudios (cuatro comunidades) valor de *p se obtuvo* por *t-student.*

RESULTADOS

En la **Tabla 1** se muestra la altitud y tipo de suelo de las cuatro comunidades estudiadas, donde se observa que la comunidad de Huiziltepec y Axaxacualco presentan una mayor altitud y que la comunidad de Mazatlán es la única que presenta un tipo de suelo regosol.

Tabla 1. Altitud y tipo de suelo de las comunidades estudiadas.

COMUNIDAD	ALTITUD (m)	TIPO DE SUELO
Mazatlán	1242	Regosol
Plan de Guerrero	1354	Leptosol
Huiziltepec	1416	Leptosol
Axaxacualco	1467	Leptosol

En la **Tabla** 2 se muestra la caracterización morfológica del *Agave cupreata* de las diferentes comunidades de colecta, donde se observan diferencias significativas en cuanto al número de hojas, ancho de la roseta y espina de la hoja, siendo mayores en la comunidad Mazatlán; comparado con las otras tres comunidades, con un valor de $p<0.05$. El resto de las características morfológicas también fueron mayores en la comunidad de mazatlán, sin embargo, no se observaron diferencias significativas $(p>0.05)$.

Tabla 2. Caracterización morfológica de *Agave cupreata* de las diferentes comunidades de colecta.

Características	(Plan de Guerrero)	(Mazatlán)	(Huiziltepec)	(Axaxacualco)	Valor *P*
Tamaño de planta (cm)	8.3 ± 1.2	11.6 ± 0.9	7.3 ± 0.4	8.2 ± 0.7	0.311
Número de hoja	8 ± 0.7	**11.4 ± 2.4**	8 ± 0.7	10.8 ± 1.9	***0.048**
Ancho de la Roseta (cm)	46.2 ± 2.2	**74.8 ± 3.5**	63.2± 8.2	65.2 ± 1.7	***0.016**
Ancho de la piña (cm)	5.9 ± 0.4	7.4 ± 0.8	5.1 ± 0.2	6.5 ± 0.5	0.092
Longitud del brote (cm)	8 ± 0.35	12 ± 1.0	7.6 ± 1.2	8.9 ± 1.0	0.174
Diámetro base del brote (cm)	1.6 ± 0.2	2 ± 0.3	1.1 ± 0.2	1.6 ± 0.2	0.730
Longitud de la hoja (cm)	10.7 ± 1.4	14.92 ± 1.3	11.3 ± 3.1	11.9 ± 1.0	0.148
Ancho de la hoja (cm)	5.0 ± 0.5	5.6 ± 0.4	5.1 ± 0.4	5.2 ± 0.6	0.784
Espina de la hoja (cm)	1.6 ± 0.3	**1.92 ± 0.1**	1.0 ± 0.0	1.6 ± 0.2	***0.008**

Se presentan las medias de diferentes parámetros y desviación estándar con valor de *(P)* por ANOVA de una vía.

Al analizar las características morfológicas de acuerdo al tipo de suelo, se observa que en el número de hoja, longitud del tallo, longitud de la hoja muestran diferencias significativas siendo mayores en el tipo de suelo Regosol, con un valor de $p<0.05$. El resto de las características morfológicas también fueron mayores en el suelo Regosol, sin embargo, no se observaron diferencias significativas $(p>0.05)$.

Tabla 3. Características morfológicas del *Agave cupreata* de acuerdo al tipo de suelo de las comunidades estudiadas.

Características	Leptosol	Regosol	Valor *P*
Tamaño de planta (cm)	11.1 ± 3.0	12.8 ± 2.4	0.063
Nº de hojas	10.3 ± 1.8	11.6 ± 1.5	***0.021**
Circunferencia de Roseta (cm)	59.8 ± 11.9	63.6 ± 14.9	0.329
Circunferencia de tallo (cm)	5.4 ± 1.9	5.3 ± 2.5	0.958
Longitud tallo (cm)	10.8 ± 2.3	12.4 ± 1.2	***0.017**
Diámetro base tallo (cm)	1.9 ± 2.4	3.7 ± 2.7	0.285
Long. hoja (cm)	12.5 ± 1.7	13.9 ± 1.5	***0.007**
Ancho hoja (cm)	6.1 ± 0.8	6.3 ± 0.8	0.414
Espina hoja (cm)	1.9 ± 0.6	2.2 ± 0.4	0.064

Los datos muestran medias y desviación estándar, valor de *p por *t-student.*

En la **tabla 4** se muestra el análisis de correlación de las características morfológicas de *Agave cupreata* con la altitud de las comunidades estudiadas, donde solo se observó una correlación negativa estadísticamente significativa con la espina de la hoja ($r = -0.32$, $p = 0.010$).

Tabla 4. Correlación de las características morfológicas del *Agave cupreata* con la altitud de las comunidades estudiadas.

Características	r	p
Tamaño de la planta	- 0.19	0.128
Número de hoja	- 0.19	0.134
Circunferencia de la roseta	0.14	0.272
Circunferencia del tallo	0.19	0.143
Longitud del tallo	- 0.20	0.123
Diámetro de la base del tallo	- 0.21	0.101
Longitud de la hoja	- 0.16	0.205
Ancho de la hoja	- 0.03	0.774
Espina de la hoja	- 0.32	**0.010***

*Correlación de Pearson o de spearman

CONCLUSIONES

Se concluye que las características morfológicas del *A. cupreata* tienen un mejor desarrollo en el tipo de suelo regosol, siendo este un suelo conformado por escasa roca lo que permite conservar más humedad, de igual manera la altitud se correlaciona negativamente con el desarrollo de la espina de la planta de agave.

BIBLIOGRAFÍA

1. Argentel Martínez, L., Idalmis Fonseca, R., Garatuza Payán, J., Yépez González, E., & González Aguilera, J. (2017). *EFECTON DE LA SALINIDAD EN SUELO*.
2. Avendaño Arrazate, C., Iracheta Don juan, L., Gódinez Aguilar, J. C., López Gómez, P., & Barrios Ayala, A. (2015). Caracterización morfológica de Agave cupreata, especie endémica de México. *Revista Internacional de Botánica Experimental*, 148–162.
3. Barrios Ayala, A., Otero Sánchez, M. Alejandro, & C. Ariza. Flores Rafael. (2015). *Caracterización Morfológica de Agave cupreata y Variabilidad de sus Descriptores* (Vol. 1, Number 2). www.ecorfan.org/spain
4. Bermúdez Bazán, M., Castillo Herrera, G. A., Urías Silvas, J. E., Escobedo Reyes, A., & Estarrón Espinosa, M. (2021). Hunting bioactive molecules from the agave genus: An update on extraction and biological potential. In *Molecules* (Vol. 26, Number 22). MDPI. https://doi.org/10.3390/molecules26226789
5. Cen Cen, E. R., Gómez Merino, F., Martínez Hernández, A., & Salgado Garciglia, R. (2015). Tolerancia de Agave tequilana a altas concentraciones de cationes metálicos divalentes. *Polibotánica*, *0*(40). https://doi.org/10.18387/polibotanica.40.11
6. Martínez Palacios, A., Gómez Sierra, J. M., Sáenz Romero, C., Pérez Nasser, N., & Sánchez Vargas, N. (2011). *Genetic Diversity of Agave cupreata TREL. e BERGER. Considerations for its conservation*.
7. Plascencia de la Torre, M. F., & Peralta Gordon, L. M. (2018). Análisis histórico de los mezcales y su situación actual desde una perspectiva ecomarxista/ Historical analysis of mezcals and their current situation from an eco-marxist approach. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, (14), 23–42. https://doi.org/10.17141/eutopia.14.2018.3579

EXTRACCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODIFICACIÓN POR ACETILACIÓN DEL MUCÍLAGO DE *Opuntia Atropes*

Jaquelyn Alvarez Marínez[1], Héctor Eduardo Martínez Flores[2], Ma. Guadalupe Garnica Romo[3], Juan Pulido Secundino[4], Dalia Samanta Aguilar Avila[5]

[1] Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [2] Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [3] Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [4] Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), Universidad Autónoma Chapingo. [5] Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Universidad de Guadalajara. Guadalajara.

hector.martinez.flores@umich.mx

RESUMEN

El mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) presenta una compleja composición rica en azúcares y ácidos urónicos, que le permite formar geles viscosos y retener agua y ser usado como aditivo al incrementar la viscosidad y modificar la textura de alimentos. El objetivo del presente estudio fue extraer y modificar por acetilación mucílago de *Opuntia atropes*. Para la extracción del mucílago se utilizó una proporción agua:nopal de 4:1 y alcohol:mucílago de 3:1 obteniéndose un rendimiento de 0.94% de mucílago. La modificación química se realizó con anhídrido acético, obteniéndose porcentajes de acetilación de 1.78 % y 2.28 %. Se evaluaron propiedades fisicoquímicas y una caracterización estructural por FTIR. En general, la acetilación provocó una disminución en la luminosidad de los mucílagos, resultando en una apariencia más oscura. Todos los mucílagos presentaron una ligera tonalidad verdosa (parámetro de color a*) y una tonalidad amarillenta (parámetro de color b*), la cual se incrementó en este parámetro después de la acetilación. El valor de actividad de agua (Aw) para el mucílago nativo fue de 0.413 y disminuyendo significativamente ($p < 0.05$) en los mucílagos acetilados. El mucílago nativo mostró un valor de capacidad de absorción de agua de 7.10 g agua/g de mucílago y aumento con la acetilación a valores de 10.26 g agua/g mucílago acetilado al 1.78% y de 10.34 g agua/g mucílago al 2.28%. En cuanto a la capacidad de absorción de aceite, la acetilación no mostró cambios significativos del mucílago nativo con relación a los mucílagos acetilados, mostrando un rango de valores de 2.51 a 2.05 g aceite/g de mucílago. El mucílago nativo presentó un valor de viscosidad de 13.1 cP y la acetilación al 1.78 % condujo a una disminución significativa ($p < 0.05$) de la viscosidad (9.81 cP) en comparación con el mucílago nativo. Los resultados obtenidos por FTIR confirmaron la presencia de estructuras de polisacáridos típicas en el mucílago nativo de O. atropes, así como la incorporación parcial de grupos acetilo en los mucílagos acetilados. Las bandas observadas relacionadas a grupos acetilos se encontraron en 2978 cm^{-1}, en 1727 cm-1 y en el rango de 1450–1370 cm^{-1}. Los resultados muestran que esta modificación química permitió alcanzar un balance favorable entre estabilidad y funcionalidad tecnológica, confirmando la viabilidad del mucílago modificado como un posible ingrediente funcional en alimentos.

INTRODUCCIÓN

La alimentación ha experimentado una evolución constante orientada no solo a cubrir los requerimientos nutricionales básicos de la población, sino también a proporcionar beneficios adicionales que contribuyan al bienestar y la prevención de enfermedades. Dentro de este contexto, ha surgido un creciente interés por los alimentos funcionales, entre los que destaca el nopal, una especie originaria de México que ha formado parte de la dieta y de la medicina tradicional desde la época prehispánica debido a su versatilidad y sus propiedades nutricionales (1,2).

El nopal se caracteriza por su importante aporte de vitaminas, especialmente A y C, así como de minerales esenciales como calcio, potasio y magnesio. Debido a esta composición, se considera un alimento con alto valor nutricional que contribuye al fortalecimiento del sistema inmunológico,

favorece los procesos digestivos y participa en el mantenimiento de la salud ósea. Asimismo, su elevado contenido de fibra dietética se ha asociado con efectos hipoglucemiantes que ayudan a regular la concentración de glucosa en sangre, lo que lo convierte en una alternativa de interés para la prevención y control de la diabetes (3,4).

Además de sus cualidades nutricionales, el nopal representa una materia prima con amplias posibilidades de aprovechamiento en la industria agrotecnológica debido a la presencia de compuestos bioactivos y tecnofuncionales. Entre ellos sobresalen los polifenoles, reconocidos por sus propiedades antioxidantes, antidiabéticas y anticancerígenas. De igual manera, contiene polisacáridos estructurales como el mucílago, un componente de interés tecnológico utilizado en la elaboración de diversos productos alimentarios, incluyendo mermeladas y formulaciones en las que puede sustituir agentes gelificantes convencionales (2,5).

El mucílago extraído de especies del género *Opuntia* ha despertado un notable interés en la industria alimentaria por sus propiedades funcionales y tecnológicas. Su composición, rica en azúcares complejos y ácidos urónicos, le confiere la capacidad de formar sistemas viscosos y de retener agua y lípidos, características que resultan especialmente útiles en el desarrollo de alimentos destinados a consumidores con diabetes o alteraciones en el metabolismo de los lípidos (6,7). Asimismo, investigaciones realizadas demostraron que la incorporación de mucílago en productos lácteos puede incrementar la viscosidad y modificar favorablemente la textura de los yogures (8). Paralelamente, diversos estudios han buscado optimizar los procesos de extracción de este biopolímero. En este sentido, los trabajos de Rodríguez-González et al. (6) y Zavala (9) constituyen antecedentes relevantes al evaluar distintas especies de nopal y metodologías de extracción con el propósito de maximizar los rendimientos obtenidos.

En el ámbito de los alimentos funcionales, el aprovechamiento del nopal representa una oportunidad para desarrollar productos innovadores con mayor valor nutricional y funcional. Sus componentes pueden emplearse no solo como ingredientes con efectos benéficos para la salud, sino también como sustitutos parciales de aditivos tecnológicos, tales como espesantes y gelificantes. Lo anterior resulta particularmente relevante para el aprovechamiento de recursos disponibles en el estado de Michoacán.

Diversas investigaciones desarrolladas por nuestro grupo de trabajo han explorado el potencial tecnológico del mucílago de *Opuntia ficus-indica*. Rodríguez (10) reportó su utilización como aditivo en una crema de huitlacoche, concluyendo que puede desempeñar eficazmente la función de agente espesante, sustituyendo aditivos tradicionales como el almidón modificado. Posteriormente, Zamora-Vega et al. (11) emplearon este polisacárido como material de pared para la microencapsulación del probiótico *Saccharomyces boulardii* y evaluaron su aplicación en queso. Domínguez-Martínez et al. (12) desarrollaron una película biodegradable a partir de mucílago de nopal. Sin embargo, tanto en las formulaciones microencapsuladas como en las biopelículas fue necesario incorporar otros aditivos para mejorar propiedades mecánicas como la flexibilidad y la resistencia. Estos resultados evidencian la necesidad de continuar investigando y modificando químicamente el mucílago con el fin de ampliar y optimizar sus propiedades funcionales. De esta manera, sería posible obtener sistemas con diferentes niveles de viscosidad y mejores características tecnológicas, favoreciendo su incorporación como ingrediente en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y de bebidas.

El objetivo del presente estudio fue extraer y modificar por acetilación mucílago de Opuntia atropes, así como realizar su caracterización físico-química, y por FTIR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Extracción de mucílago de *Opuntia atropes*

Se colectó *Opuntia atropes* en el Campus Morelia de la Universidad Autónoma Chapingo (CRUCO). El mucílago fue extraído utilizando un método modificado por Rodríguez (10) y Zavala (9), con algunas variaciones con base a los estudios por Medina-Torres *et al.* (13).

Inicialmente, se retiraron las espinas de las pencas de nopal. Las pencas fueron lavadas con agua y jabón, cortadas en cuadros de aproximadamente 1 cm^2 y molidas en una licuadora con agua, empleando proporciones nopal:agua de 1:8, 1:6 y 1:4 (p/V). La mezcla se sometió a calentamiento a 83 ± 2 °C durante 2 h. Para la filtración, algunas muestras fueron centrifugadas a 3500 rpm durante 15 min, mientras que otras se filtraron utilizando un tamiz de acero inoxidable de malla 140.

El sobrenadante fue concentrado en una olla de acero inoxidable, sometiéndolo a calentamiento con agitaciones frecuentes hasta reducir su volumen a un tercio. Enseguida, el mucílago extraído, contenido en el sobrenadante, se precipitó por adición de etanol al 96% en proporciones alcohol:mucílago de 1:4, 1:3 y 1:3 (v/v), respectivamente. La mezcla se dejó reposar a temperatura ambiente durante 24 h. El mucílago aglomerado se recuperó por decantación y se secó a 40 °C durante 24 h en un horno de secado digital (ECOSHEL, modelo 9053). El mucílago seco fue molido en licuadora hasta obtenerlo en forma de polvo.

Modificación química del mucílago de *Opuntia atropes* por acetilación

La modificación por acetilación del mucílago de *O. atropes* se llevó con los métodos reportados en la literatura con algunas modificaciones (14,15). Se emplearon dos niveles de anhídrido acético, en una relación de 11.6 mL/g (anhídrido acético/mucílago) y otra de 5.8 mL/g (anhídrido acético/mucílago). Inicialmente, el mucílago nativo fue dispersado en una solución de etanol al 75% y agitado durante 10 min a temperatura ambiente. Posteriormente, el pH de la dispersión fue ajustado a 8.0 mediante la adición de hidróxido de sodio. A continuación, el anhídrido acético se agregó gota a gota a la mezcla, manteniendo el pH en un rango de 8.0 - 8.3. La reacción se mantuvo por 10 min. Posteriormente, la mezcla fue ajustada a pH de 4.5 con ácido clorhídrico. El mucílago acetilado fue recuperado mediante centrifugación (3500 rpm por 15 min) y lavado tres veces con etanol al 75%. Finalmente, el mucílago modificado se llevó a secado en horno digital por 24 h a 40 °C, el mucílago obtenido se molió y se tamizó en malla N° 120. Este procedimiento de modificación se replicó por triplicado.

Grupos acetilo y grado de sustitución

Los grupos acetilo y grado de sustitución del mucílago acetilado fueron determinados (16), con modificaciones. Para ello, una muestra de 0.5 g de los mucílagos acetilados fueron pesadas y transferidas a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Luego, se adicionaron 25 mL de agua destilada y 3 gotas de fenolftaleína como indicador. Se agregaron 12.5 mL de una solución de NaOH 0.45 N, y las mezclas se agitaron por 30 min. Enseguida, las muestras se titularon con una solución de HCl 0.2 N hasta la aparición de un color rosa. Simultáneamente, se preparó y tituló un blanco utilizando mucílago nativo. El porcentaje de acetilación (% Acetil) representa el porcentaje en peso de grupos acetil en el mucílago en base seca y se calculó de la siguiente manera:

$$\%\ \boldsymbol{Acetil} = \frac{(\boldsymbol{mL\ blanco}) - (\boldsymbol{mL\ muestra})\ \boldsymbol{x\ N\ del\ HCl\ x\ 0.043}}{\boldsymbol{peso\ muestra\ b.s.\ (g)}}$$

El grado de sustitución es definido como el número promedio de sitios por unidad de azúcar que posee un grupo sustituyente y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Grado\ de\ sustitución} = \frac{\boldsymbol{162\ x\ \%\ Acetil}}{\boldsymbol{4300 - (42\ x\ \%\ Acetil)}}$$

Caracterización del mucílago nativo y acetilado

pH. Se mezclaron en un vaso de precipitado 0.5 g de mucílagos nativo y acetilados en 5 mL de agua destilada, respectivamente. El pH de los mucílagos se determinó con un potenciómetro (modelo YY-1030). La sonda del medidor de pH se introdujo en el vaso de precipitado que contenía el mucílago, manteniéndola en contacto con la muestra y se tomó la lectura del pH.

Color. El color se determinó en mucílagos nativos y acetilados en polvo mediante un colorímetro BYK Gardner de color y brillo (modelo BK-EXP0010166). Este método incluye los valores de *L**

(Luminosidad), *a** (tonos rojo-verde) y *b** (tonos amarillo-azul) del espacio de color CIELAB, así como los valores de *C** (croma) y *h°* (tono o matiz).

Actividad de agua (Aw). La actividad de agua de los mucílagos nativo y acetilados en polvo se determinó por triplicado utilizando un medidor de actividad de agua LabSwift Novasina.

Capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de absorción de aceite (OAC)
Se determino la capacidad de absorción de agua (17). Se colocaron 0.3 g de mucílagos nativo y acetilados en polvo en tubos Falcon junto con 4.5 mL de agua destilada. Las mezclas se homogenizaron en un vortex por 10 min y, se agitaron en un agitador orbital (modelo CVP-2000P) por 1 h. Después, se centrifugaron a 4000 rpm por 10 min. Los sobrenadantes se decantaron y se determinaron los pesos de los mucílagos con el agua absorbida.
La capacidad de absorción de agua se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{WAC\ (g\ agua/g\ mucílago)} = \frac{\boldsymbol{A - B}}{\boldsymbol{B}}$$

Donde: A= Peso (g) de mucílago seco y agua absorbida; B= Peso (g) de mucílago seco.

La capacidad de absorción de aceite se midió siguiendo el mismo procedimiento, solamente sustituyendo agua por el aceite.

Viscosidad
Se colocaron en un matraz Erlenmeyer los mucílagos nativos y acetilados en polvo y agua destilada en una proporción de 1:100, respectivamente, y se mantuvieron en agitación constante a 600 rpm por 24 h a temperatura ambiente, usando una parrilla de calentamiento con agitador. Posteriormente, se tomaron 10 mL de las soluciones y se colocaron en un viscosímetro (modelo Brookfield DV3T) usando la aguja ULA (0). Las velocidades de rotación se seleccionaron de manera que el porcentaje de torque no fuera inferior al 10%. La viscosidad se midió variando la velocidad de rotación en orden ascendente (50, 75 y 100 rpm). Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente.

Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)
Se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para determinar la presencia de los diversos enlaces en las estructuras de los mucílagos nativos, acetilado al 2.28% y acetilado al 1.78%empleándose un espectrómetro Bruker IR-FT Vertex 70 con accesorio ATR. El análisis se realizó en el rango de número de onda de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1}, con una resolución de 4 cm^{-1} y un tiempo de barrido de 32 s.

Análisis estadístico
Todas las determinaciones experimentales se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como la media ± la desviación estándar. Para evaluar la existencia de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos (mucílago nativo, mucílago acetilado 1.78 % y mucílago acetilado 2.28 %), se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA). En los casos en que el ANOVA reveló diferencias significativas ($p < 0.05$), se llevó a cabo una prueba post-hoc de Tukey (HSD) para identificar cuáles grupos específicos presentaban diferencias estadísticamente significativas. Un valor de $p < 0.05$ fue considerado como estadísticamente significativo. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron utilizando el software RStudio v4.3.2 (R Core Team, 2023), a través de la interfaz RStudio v2023.12.0 (Build 369), desarrollada por Posit Software, PBC.

RESULTADOS

Extracción de Mucílago de *Opuntia atropes*
Para cada ensayo se realizó la extracción de mucílago utilizando 1 kg de *Opuntia atropes*. Los rendimientos obtenidos se muestran en la Tabla 1. El análisis estadístico, mediante ANOVA y la prueba de comparación de medias de Tukey, indicó que no existieron diferencias significativas entre

los tratamientos evaluados. Aunque los distintos tratamientos presentaron rendimientos estadísticamente similares, la combinación de una relación 4:1 (agua) y 3:1 (alcohol:mucílago) destacó como la alternativa más conveniente. Esta condición permitió obtener resultados comparables a los demás tratamientos, pero con un menor consumo de insumos y una mayor eficiencia operativa, reduciendo tanto el tiempo de procesamiento como los costos asociados. Por ello, se considera la opción más adecuada para su aplicación en futuros procesos de extracción.

Tabla 1. Rendimiento promedio en la extracción del mucílago de *Opuntia atropes*.

Proporción	Rendimiento (%)
8:1 agua:nopal; 4:1 alcohol:mucílago	$0.997^{a} \pm 1.69$
6:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago	$0.790^{a} \pm 2.03$
4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago	$0.940^{a} \pm 1.37$

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Acetilación, grupos acetilo y grado de sustitución en mucílago acetilados

La acetilación del mucílago nativo se realizó bajo dos condiciones experimentales que difirieron en la cantidad inicial de material empleada, utilizando 2 g y 4 g de mucílago, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Se observó que el tratamiento con 2 g de mucílago alcanzó los valores más altos tanto de porcentaje de acetilación (2.28%) como de grado de sustitución (0.088), mientras que con 4 g de muestra registró un 1.78% de acetilación y un grado de sustitución de 0.068.

Las diferencias observadas pueden explicarse por la proporción reactivo-sustrato utilizada en cada tratamiento. Aunque el volumen de anhídrido acético se mantuvo constante, la relación de reactivo por unidad de masa fue distinta: 11.6 mL/g para el tratamiento con 2 g de mucílago y 5.8 mL/g para el tratamiento con 4 g. En consecuencia, al aumentar la cantidad de mucílago sin ajustar el volumen de reactivo, se redujo la disponibilidad de anhídrido acético por gramo de muestra, limitando la incorporación de grupos acetilo y generando valores menores de acetilación y grado de sustitución.

Una mayor relación entre el reactivo y el sustrato favorece la interacción del anhídrido acético con los grupos hidroxilo presentes en la estructura del mucílago, incrementando potencialmente el número de sitios modificados. Este comportamiento ha sido reportado en diversos estudios sobre polisacáridos, donde el aumento de la relación líquido-sólido se ha asociado con una mayor eficiencia en los procesos de acetilación (18,19). Bajo esta perspectiva, es razonable considerar que el empleo de 4 g de mucílago manteniendo la misma proporción de 11.6 mL/g habría podido favorecer un incremento en el porcentaje de acetilación y en el grado de sustitución.

Sin embargo, el aumento de la cantidad de reactivo también debe evaluarse desde una perspectiva regulatoria. Un mayor nivel de modificación química podría conducir a valores superiores a los límites generalmente aceptados para ingredientes alimentarios modificados, los cuales se sitúan alrededor de 2.5% de grupos acetilo y un grado de sustitución de 0.1 en almidones acetilados (20,21). Por ello, aunque una mayor proporción de reactivo podría mejorar la eficiencia de la reacción, no necesariamente representaría la alternativa más adecuada para aplicaciones destinadas al consumo humano.

Tabla 2. Rendimientos, porcentaje de acetilación y grado de sustitución de los mucílagos acetilados de *Opuntia atropes*.

Mucílago modificado	Rendimiento (g)	Rendimiento (%)	Acetilación (%)	Grado de Sustitución (GS)
De 2g	1.39 ^{b} ± 0.170	69.98 ^{b} ± 8.530	2.28 ^{a} ± 0.075	0.088 ^{a} ± 0.003
De 4g	3.29 ^{a} ± 0.026	82.48 ^{a} ± 0.670	1.78 ^{b} ± 0.135	0.068 ^{b} ± 0.005

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Caracterización de los mucílagos nativo y acetilados al 1.78% y 2.28%
pH

Los valores de pH obtenidos del mucílago nativo y acetilados al 1.78% y 2.28% de *O. atropes* fueron de 6.60^{a} ± 0.01, 4.97^{b} ± 0.01 y 4.97^{b} ± 0.01, respectivamente. El mucílago nativo tuvo un valor promedio de 6.60, resultado que se encuentra en el rango reportado por Vargas-Rodríguez et al. (22). En cambio, los mucílagos acetilados al 1.78% y 2.28% presentaron un pH promedio significativamente inferior en ambos casos. Esta reducción en el pH se relaciona con la técnica de acetilación empleada, la cual incorpora grupos acetilo en la estructura del polisacárido, así como la posible presencia de ácido acético residual, y el pH final en que se estabiliza el mucílago. Un pH ligeramente ácido podría influir en las propiedades funcionales del mucílago, incluyendo su capacidad para gelificar, viscosidad, interacciones con otros componentes, entre otros (6).

Color

La Tabla 3 muestra los valores promedio de los parámetros colorimétricos determinados mediante el sistema CIELAB para los mucílagos en polvo de *O. atropes*, tanto en su forma nativa como después de la modificación por acetilación. El análisis de los resultados permitió identificar las siguientes tendencias:

L*: La modificación química produjo una reducción en los valores de luminosidad, indicando que los mucílagos acetilados presentaron una apariencia más oscura que el material nativo. Además, el tratamiento con mayor porcentaje de acetilación (2.28%) registró una disminución ligeramente más pronunciada en comparación con el tratamiento de 1.78%, aunque las diferencias entre ambos fueron menores que las observadas entre el mucílago nativo y los modificados.
a*: Los valores obtenidos para este parámetro evidenciaron una ligera tendencia hacia tonalidades verdes en todas las muestras analizadas.
b*: Se observó una predominancia de tonalidades amarillas en los tres tratamientos, con un incremento de este componente cromático tras el proceso de acetilación.
C*: Los mucílagos modificados mostraron mayores valores de cromaticidad, lo que indica una coloración más intensa o saturada en comparación con el mucílago sin modificar.
h°: Aunque la tonalidad general permaneció dentro de la región amarillo-verde, la acetilación provocó un desplazamiento del ángulo de tono hacia valores más cercanos a 90°, correspondientes a una tonalidad amarilla más definida, comportamiento consistente con el aumento observado en el parámetro b*.

De manera general, la acetilación ocasionó una disminución en los valores de L*, a* y h°, reflejando modificaciones perceptibles en las características visuales del mucílago. Estos cambios pueden estar relacionados con la incorporación de grupos acetilo a la estructura del polisacárido, lo que altera la organización de la red macromolecular y modifica la interacción del material con la luz. Asimismo, dichas modificaciones estructurales pueden influir en la distribución y estabilidad de los pigmentos naturales presentes en la muestra. En este sentido, Agate et al. (23) señalaron que las modificaciones químicas de los polímeros pueden afectar su conformación y microestructura, generando variaciones en sus propiedades ópticas y, por consiguiente, en sus parámetros colorimétricos.

La caracterización del color constituye una herramienta importante para la evaluación de la calidad de materias primas y productos procesados. Además, esta información puede utilizarse para diferenciar materiales, identificar variaciones entre especies o tratamientos, y contribuir al diseño de productos con atributos visuales específicos que favorezcan su aceptación por parte del consumidor.

Tabla 3. Valores del modelo CIELAB para los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes* obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	*L**	*a**	*b**	*C**	*h°*
Nativo	63.09 ^{a} ± 1.34	-1.50 ^{a} ± 0.02	8.97 ^{c} ± 0.15	9.33 ^{c} ± 0.29	98.34 ^{a} ± 0.84
Acetilado al 1.78%	50.06 ^{b} ± 2.30	-1.45 ^{b} ± 0.06	13.81 ^{a} ± 0.82	14.06 ^{a} ± 0.63	95.74 ^{b} ± 0.27
Acetilado al 2.28%	48.44 ^{c} ± 1.86	-1.25 ^{c} ± 0.15	11.35 ^{b} ± 0.48	11.94 ^{b} ± 1.35	95.25 ^{c} ± 0.77

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Actividad de agua (Aw)

La actividad de agua (Aw) se determinó en los mucílagos nativo y acetilados de *O. atropes*. Los valores obtenidos fueron de 0.413 ± 0.001 para el mucílago nativo, 0.279 ± 0.004 para el mucílago con 1.78% de acetilación y 0.309 ± 0.001 para el mucílago con 2.28% de acetilación.

El análisis estadístico evidenció diferencias significativas entre el mucílago nativo y los tratamientos modificados, así como entre los dos niveles de acetilación evaluados. El mucílago acetilado al 1.78 % presentó el valor más bajo de actividad de agua, mientras que el tratamiento con 2.28 % mostró un valor ligeramente superior; sin embargo, ambos permanecieron significativamente por debajo del registrado para el mucílago nativo.

La reducción de la actividad de agua observada tras la acetilación sugiere una modificación en la capacidad del polisacárido para interactuar y retener moléculas de agua. Este comportamiento podría atribuirse a la incorporación de grupos acetilo en la estructura del mucílago, proceso que disminuye la disponibilidad de grupos hidroxilo capaces de establecer enlaces de hidrógeno con el agua (18). En consecuencia, se reduce la fracción de agua libre presente en el sistema.

Desde el punto de vista tecnológico, los bajos valores de Aw obtenidos indican una limitada disponibilidad de agua para el desarrollo de microorganismos y para la ocurrencia de reacciones químicas asociadas al deterioro. Por ello, tanto el mucílago nativo como los modificados presentan características favorables de estabilidad durante el almacenamiento y un potencial para mantener una vida útil prolongada. Estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura (24) para mucílago de nopal, lo que refuerza la evidencia sobre su estabilidad fisicoquímica.

Las propiedades observadas hacen del mucílago de nopal un ingrediente con potencial para aplicaciones en la industria alimentaria, ya que podría contribuir a mejorar la conservación de los productos, prolongar su vida útil y reducir la dependencia de aditivos conservadores convencionales.

Capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de absorción de aceite OAC)

Los resultados de capacidad de absorción de agua (WAC) y capacidad de absorción de aceite (OAC) se presentan en la Tabla 4. El mucílago nativo de *O. atropes* mostró una WAC de 7.10 ± 0.18 g agua/g de mucílago, mientras que los mucílagos acetilados registraron valores significativamente mayores ($p < 0.05$), alcanzando 10.26 ± 0.21 y 10.34 ± 0.34 g agua/g para los grados de acetilación de 1.78% y 2.28%, respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Este incremento sugiere que la acetilación promovió cambios estructurales que favorecieron la retención de agua, posiblemente debido a una mayor apertura de la red polisacárida y a la reducción de interacciones

intermoleculares, fenómeno reportado previamente en polisacáridos y almidones modificados (25,26).

En comparación con valores reportados para mucílago nativo de *Opuntia ficus-indica* (27), los resultados obtenidos fueron considerablemente superiores, lo que podría atribuirse a diferencias entre especies, condiciones de cultivo y metodologías de procesamiento. La elevada capacidad de absorción de agua observada destaca el potencial de estos mucílagos como espesantes, estabilizantes y agentes formadores de geles en aplicaciones alimentarias.

Respecto a la OAC, no se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el mucílago nativo (2.51 ± 0.29 g aceite/g de mucílago) y los tratamientos acetilados (2.24 ± 0.11 y 2.05 ± 0.07 g aceite/g de mucílago para 1.78 % y 2.28 % de acetilación, respectivamente). Estos resultados indican que el grado de sustitución alcanzado no fue suficiente para modificar de manera importante la interacción del mucílago con los lípidos. En conjunto, los mucílagos nativo y modificados mostraron una capacidad moderada de absorción de aceite, característica que podría favorecer su utilización como estabilizantes o agentes emulsificantes en sistemas alimentarios.

Tabla 4. Capacidad de absorción de agua del mucílago nativo y modificados de *Opuntia atropes* obtenidos de la extracción del tratamiento 4:1 agua:nopal; 3:1 alcohol:mucílago.

Mucílago	WAC (g agua/g mucílago)	OAC (g aceite/g mucílago)
Nativo	7.10^{b} ± 0.18	2.51^{a} ± 0.29
Acetilado al 1.78%	10.26^{a} ± 0.21	2.24^{a} ± 0.11
Acetilado al 2.28%	10.34^{a} ± 0.34	2.05^{a} ± 0.07

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Viscosidad

La viscosidad de los mucílagos nativo y acetilados de *O. atropes* se evaluó a 100 rpm (Tabla 5), observándose diferencias significativas ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos. El mucílago nativo presentó una viscosidad de 13.10 ± 0.38 cP. La acetilación al 1.78% redujo significativamente este valor a 9.81 ± 1.21 cP, probablemente debido a la disminución de las interacciones intermoleculares y de los puentes de hidrógeno entre las cadenas polisacáridas. En contraste, el mucílago acetilado al 2.28% mostró la viscosidad más alta (17.77 ± 0.55 cP), superando incluso al material nativo.

Este comportamiento sugiere que el efecto de la acetilación depende del grado de sustitución. Mientras que niveles bajos de modificación favorecen una estructura menos cohesiva y reducen la viscosidad, grados de sustitución más elevados pueden promover la reorganización de la red polisacárida y el establecimiento de interacciones hidrofóbicas, incrementando la resistencia al flujo. Esta tendencia coincide con lo reportado en polisacáridos modificados (28).

Tabla 5. Evaluación de la viscosidad de los mucílagos nativo y modificados de *Opuntia atropes* a 100 rpm.

Mucílago	Viscosidad (cP)
Nativo	13.10^{b} ± 0.38
Acetilado 1.78 %	9.81^{c} ± 1.21
Acetilado 2.28 %	17.77^{a} ± 0.55

Letras diferentes en la misma columna significa la existencia de diferencias significativas ($p < 0.05$).

Análisis de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El análisis por FTIR permitió identificar los principales grupos funcionales presentes en el mucílago nativo (MN) y en los mucílagos acetilados (MA4 y MA2) de *Opuntia atropes* (Figura 1).

Los espectros FTIR mostraron una banda ancha alrededor de 3300 cm^{-1}, atribuida a los grupos hidroxilo (O–H) característicos de los polisacáridos. Esta señal presentó una menor intensidad en los mucílagos acetilados, especialmente en MA2, lo que sugiere la sustitución parcial de grupos

hidroxilo por grupos acetilo durante la modificación química. Asimismo, se identificaron bandas asociadas a grupos C–H (~2920 y ~2850 cm^{-1}), grupos carboxilato (COO^-) (~1625 y ~1423 cm^{-1}) y deformaciones de grupos CH_3 y CH_2 (1450–1370 cm^{-1}), características de la estructura polisacárida del mucílago. En la región de 1150–1000 cm^{-1}, correspondiente a los enlaces glucosídicos (C–O–C y C–O), los espectros del mucílago nativo (MN) y del mucílago acetilado al 1.78 % (MA4) conservaron bandas bien definidas, mientras que en el mucílago acetilado al 2.28 % (MA2) estas señales se observaron más aplanadas. Un comportamiento similar se presentó en la región de huella digital (1000–500 cm^{-1}), donde MA2 mostró una menor definición de las bandas, indicando una mayor alteración estructural y pérdida de orden molecular. En conjunto, los resultados de FTIR confirman la naturaleza polisacárida del mucílago de *Opuntia atropes* y evidencian la incorporación de grupos acetilo en las muestras modificadas. Además, sugieren que la acetilación al 1.78 % preservó en mayor medida la organización estructural del material, mientras que la acetilación al 2.28 % produjo cambios más notorios en la conformación molecular.

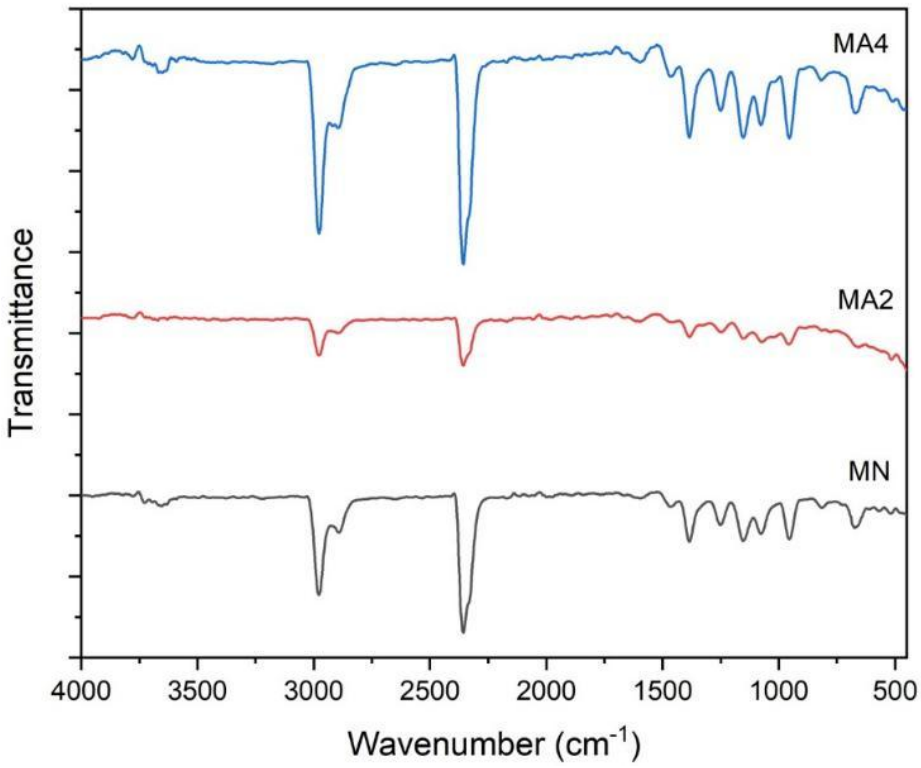


Figura 1. Espectros del mucílago nativo (MN) y del mucílago acetilado al 1.78% (MA4) y 2.28% (MA2) de *Opuntia atropes*, obtenidos mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes de la presente investigación fueron: i) la extracción optimizada del mucílago permitió obtener una materia prima funcional a partir de una especie nativa de nopal con escaso aprovechamiento industrial. ii: los diferentes grados de acetilación generaron modificaciones estructurales que se tradujeron en variaciones en el pH, la viscosidad, la actividad de agua, así como en su capacidad de absorción de agua y aceite. iii) estas transformaciones se corroboraron mediante caracterización espectroscópica (FTIR) y análisis fisicoquímico, observándose una mejora significativa en ciertas propiedades tecnológicas que podrían respaldar su uso en formulaciones alimentarias.

BIBLIOGRAFÍA

1. Secretaría Nacional De Inspección y Certificación de Semillas. (2017). Nopales, cultivo emblemático de México. gob.mx. https://www.gob.mx/snics/articulos/nopales-cultivo-emblematico-de-mexico?idiom=es
2. R. L. Torres-Ponce, D. Morales-Corral, M. de L. Ballinas-Casarrubias, G. V. Nevárez-Moorillón, “El nopal: planta del semidesierto con aplicaciones en farmacia, alimentos y nutrición animal”, Rev. Mex. Cienc. Agríc., Vol. 6, 5, 2015, pp 1129–1142
3. IMSS. Instituto Mexicano Del Seguro Social. (2018). Nopal, auxiliar en el control de la diabetes y la hiperglucemia. https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201810/265#:~:text=Explic%C3%B3%20que%20el%20nopal%20contiene,y%20el%20humo%20del%20cigarro.
4. SADER. Secretaría De Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). El nopal mexicano: Un tesoro nutricional de la tierra. gob.mx. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-mexicano-un-tesoro-nutricional-de-la-tierra
5. Ponce-Luna, E. Pérez-Escalante, L. García-Curiel, A. A. Hernández-Hernández, E. Contreras-López, J. G. Pérez-Flores, “Potencial del Nopal (Opuntia Ficus-indica) para su incursión en la industria de la confitería: una breve revisión”, Investigación y Desarrollo En Ciencia y Tecnología de Alimentos, Vol. 8, 2023, pp 491-500.
6. S. Rodríguez-González, H. E. Martínez-Flores, C. K. Chávez-Moreno, L. I. Macías-Rodríguez, E. Zavala-Mendoza, M. G. Garnica-Romo, L. Chacón-García, L. (2014). Extraction and characterization of mucilage from wild species of Opuntia. J. Food Process Eng., Vol. 37, 3, 2014, pp. 285–292.
7. F. H. E. Martínez, R.M.G. Garnica, “Georreferenciación y caracterización de cinco especies silvestres de Opuntia localizadas en Michoacán”, En: “Opuntia Aportaciones a su aprovechamiento”, editores: Liberato Portillo, Rafael S., Vigueras A.L., Romo R de S. Editorial de la Universidad de Guadalajara. 2021, ISBN: 978-607-571-281-5.
8. V. Herrera-Enciso, F. Herrera-Enciso, E. R. Ojeda, “Aplicación del mucílago de nopal (Opuntia ficus-indica) como espesante en yogurt bebible (Application of nopal mucilago (Opuntia ficus-indica) as thickener in drinking yogurt”, Pistas Educativas, Vol. 43, 139, 2021, pp 408-421.
9. M. E. Zavala, “Optimización del proceso de extracción del mucílago de cinco especies de Opuntia (L.) Miller de Michoacán. 2012. [Tesis Maestría. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
10. G. S. Rodríguez, “Efecto de la incorporación de mucílago de nopal sobre las propiedades propiedades sensoriales y texturales de una pasta a base de huitlacoche (Ustilago maydis). 2010, [Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
11. R. Zamora-Vega, J. L. Montañez-Soto, H. E. Martínez-Flores, R. Flores-Magallón, C. V. Muñoz-Ruiz, J. Venegas-González, T. J. Ariza Ortega, “Effect of incorporating prebiotics in coating materials for the microencapsulation of Saccharomyces boulardii”, Int. J. Food Sci. Nutr., Vol. 63, 8, 2012, pp 930-935.
12. B. M. Dominguez-Martínez, H. E. Martínez-Flores, J. J. Berrios, C. G. Otoni, D. Wood, G. Velazquez, “Physical characterization of biodegradable films based on chitosan, polyvinyl alcohol and Opuntia mucilage” Journal of Polymers and Environment, 25:683-691. J. Polym. Environ., Vol. 25, 3, 2017, pp 683–691.
13. L. Medina-Torres, E. Brito-De La Fuente, B. Torrestiana-Sanchez, R. Katthain, “Rheological properties of the mucilage gum (Opuntia ficus indica)”, Food Hydrocoll., Vol. 14, 5, 2000, pp 417–424.
14. J. Huang, H. Schols, Z. Jin, E. Sulmann, A. Voragen, “Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea, cowpea and chickpea starches after modification with acetic anhydride and vinyl acetate”, Carbohydrate Polymers, Vol. 67, 1, 2007, pp 11–20.
15. J. Prieto-Méndez, C. L. Trejo-Cárdenas, F. Prieto-García, M. A. Méndez-Manzo, L. A. Bello-Pérez, A. D. Román-Gutiérrez, “Acetilación y caracterización del almidón de cebada. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, Vol. 6, 1, 2010, pp 32-43.
16. G. Vargas, P. Martínez, C. Velezmoro, C, “Propiedades funcionales de almidón de papa (Solanum tuberosum) y su modificación química por acetilación”, Sci. Agropecu., Vol. 7, 2016, pp 23-230.

17. M. D. Bocarando-Guzmán, S. Luna-Suárez, A. S. Hernández-Cázares, J. A. Herrera-Corredor, J. V. Hidalgo-Contreras, M. A. Ríos-Corripio, “Comparison of the physicochemical and functional properties of flour and protein isolate from moringa (Moringa oleifera Lam.) leaves”, Int. J. Food Prop., Vol. 25, 1, 2022, pp 733–747.
18. Z. Hu, J. Sun, L. Jin, T. Zong, Y. Duan, H. Zhou, W. Zhou, G. Li, “Acetylation Modification, Characterization, and Anticomplementary Activity of Polysaccharides from Rhododendron dauricum Leaves”, Polymers, Vol. 14, 15, 2022, pp 3130.
19. J. J. Poon, C. Y. Cheok, M. C. Tan, “Optimization of Bioplastic Film from Kapok Cellulose Production at Different Acetylation”, J. Polym. Environ., Vol. 32, 6, 2023, pp 2576–2588.
20. EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS), Mortensen, A., Aguilar, F., Crebelli, R., Di Domenico, A., Dusemund, B., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Lambré, C., Leblanc, J.-C., Lindtner, O., Moldeus, P., Mosesso, P., Parent-Massin, D., Oskarsson, A., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Wright, M., … Woutersen, R. A. Re-evaluation of oxidised starch (E 1404), monostarch phosphate (E 1410), distarch phosphate (E 1412), phosphated distarch phosphate (E 1413), acetylated distarch phosphate (E 1414), acetylated starch (E 1420), acetylated distarch adipate (E 1422), hydroxypropyl starch (E 1440), hydroxypropyl distarch phosphate (E 1442), starch sodium octenyl succinate (E 1450), acetylated oxidised starch (E 1451) and starch aluminium octenyl succinate (E 1452) as food additives. EFSA Journal, Vol. 15, 10, 2017, e04911
21. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives FAO - Joint Secretariat. (2015). FAO/WHO.https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/jecfa/2015_02_22_Modified_Starches.pdf
22. L. Vargas-Rodríguez, G. A. Figueroa, C. H. H. Méndez, A. P. Nieto, M. I. G. Vieyra, J. R. R. Núñez, “Propiedades físicas del mucílago de nopal”, Acta Universitaria, Vol. 26, 2016, pp 8-11.
23. S. Agate, A. Williams, J. Dougherty, O. D. Velev, L. Pal, “Polymer Color Intelligence: Effect of materials, instruments, and measurement Techniques – a review”. ACS Omega, Vol. 8, 26, 2023, pp 23257–23270.
24. V. S. Farías-Cervantes, A. Chávez-Rodríguez, E. Delgado-Licon, J. Aguilar, H. Medrano-Roldan, I. Andrade-González, “Effect of Spray Drying of Agave Fructans, Nopal Mucilage and Aloe Vera Juice”, J. Food Process. Preserv., Vol. 41, 4, 2016, e13027.
25. M. K. Bolade, J. O. Oni, “Influence of acetylation on the physicochemical properties of composited starches from sweet potato (Ipomoea batatas L.) and water yam (Dioscorea alata L.). Afr. J. Biotechnol., Vol. 14, 51, 2016, 3340–3349.
26. W. Zhang, G. Huang, “Preparation, characteristics and antioxidant activity of mung bean peel polysaccharides”, Sci. Rep., Vol. 14,1, 2024, 22161.
27. A. Mejía, “Análisis de las propiedades funcionales y fisicoquímicas de mezclas goma de mezquite/mucílago de nopal [Tesis de licenciatura, UAEM - Facultad de Química]. 2022, http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/112923/Tesis%20Araceli%20Mejía.pdf?sequence=2
28. E. Konował, J. Sulej-Chojnacka, K. Prochaska, “New derivatives of modified starch for food technology”, Molecules, 29(14), 2024, pp 3292.

DESARROLLO DE UNA BEBIDA FERMENTADA CARBONATADA A PARTIR DE LA CÁSCARA DE LA PIÑA (*Ananas Comosus)* Y KEFIR DE AGUA, COMO ALTERNATIVA DE BEBIDA FUNCIONAL

Mitzi Guadalupe Vega Morales, María Guadalupe Méndez Ramos, Iván Rivera Chávez, Aracely Garibay Linares, Naydelin Citlaly Ojendis de Jesús, Josué Adiel Torres Islas y Angel David Uribe García

Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, Ingeniería en Alimentos.
m_vega@utcgg.edu.mx

RESUMEN

El procesamiento industrial de la piña (Ananas comosus) genera grandes volúmenes de residuos agroalimentarios, principalmente cáscaras y coronas, que representan un desafío ambiental y económico para la industria. En el contexto actual enfoque de producción sostenible con reducción de desechos la valorización de estos subproductos mediante herramientas biotecnológicas constituye una estrategia clave para el desarrollo de alimentos sostenibles y con valor agregado. La cáscara de piña destaca por su contenido de azúcares fermentables, compuestos fenólicos, fibra dietética y microbiota nativa, lo que la convierte en un sustrato potencial para procesos fermentativos. Por otro lado, el kéfir de agua, constituido por un consorcio simbiótico de bacterias ácido-lácticas, bacterias ácido-acéticas y levaduras, representa un cultivo iniciador capaz de transformar sustratos azucarados en bebidas con características funcionales. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una bebida fermentada y carbonatada a partir de cáscara de piña y kéfir de agua, como alternativa sustentable dentro del campo de la ingeniería en alimentos. La metodología consistió en la formulación de una bebida base elaborada con agua purificada, cáscaras de piña, y piloncillo como fuente adicional de carbohidratos. Esta mezcla se sometió a fermentación a 30 °C durante 72 horas y posteriormente se pasteurizó a 65 °C por 15 minutos para estabilizar el producto intermedio. Paralelamente, los gránulos de kéfir de agua se activaron e inocularon a una concentración de 50 g/L en solución azucarada, fermentándose a 30 °C durante 48 horas; posteriormente se filtraron para separar los gránulos. Ambas fracciones fermentadas se mezclaron y el producto final se sometió a una pasteurización lenta seguida de carbonatación, alcanzando entre 2 y 3 volúmenes de CO_2, con el fin de proporcionar efervescencia y mejorar la aceptabilidad sensorial. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos como pH, acidez titulable y sólidos solubles totales (°Brix), además de análisis microbiológicos que incluyeron el recuento de coliformes totales y mesófilos aerobios, con el propósito de verificar la calidad e inocuidad del producto. Asimismo, se realizó una prueba de aceptación sensorial mediante escala hedónica de cinco puntos con panelistas no entrenados. Todas las determinaciones se efectuaron por triplicado para garantizar la confiabilidad de los resultados. De manera cualitativa, la bebida fermentada presentó una disminución del pH y de los °Brix respecto a la formulación inicial, evidenciando el consumo de azúcares y la producción de ácidos orgánicos característicos de la fermentación. El perfil sensorial se describió como ácido-dulce equilibrado, con aroma frutal y ligera efervescencia, atributos asociados a bebidas fermentadas no alcohólicas. Los análisis microbiológicos mostraron ausencia de coliformes y conteos dentro de los límites permisibles, indicando condiciones adecuadas de higiene y seguridad durante el proceso. En conclusión, la transformación biotecnológica de la cáscara de piña mediante fermentación con kéfir de agua permitió obtener una bebida carbonatada con características sensoriales agradables y parámetros de calidad adecuados. Esta propuesta demuestra el potencial de los subproductos agroindustriales como materia prima para el desarrollo de bebidas funcionales sostenibles, contribuyendo a la reducción de residuos, al aprovechamiento integral de recursos y al fortalecimiento de la economía circular en la industria alimentaria.

INTRODUCCIÓN

En el contexto alimentario contemporáneo, existe una marcada preferencia y demanda de los consumidores hacia productos de origen natural que no solo satisfagan atributos sensoriales placenteros, sino que también actúen como alimentos funcionales que aporten beneficios específicos a la salud y al equilibrio del organismo. Dentro de esta gama de productos, las bebidas fermentadas que contienen microorganismos probióticos han tomado un rol protagónico en el mercado global. Sin embargo, la oferta comercial predominante continúa saturada de bebidas carbonatadas con altos contenidos de azúcares refinados, aditivos artificiales y nulo valor nutricional.

En la región de la Costa Grande del estado de Guerrero, México, la producción de piña (Ananas comosus) representa una actividad agrícola de gran. No obstante, las cadenas de procesamiento local sufren de una falta de aprovechamiento de la fruta. Comúnmente, la industria de transformación y los consumidores finales concentran su interés de forma exclusiva en la pulpa fresca, lo que ocasiona que fracciones volumétricas y nutricionales muy significativas, tales como la cáscara y las hojas de la corona, sean tratadas como residuos orgánicos y desechadas. La acumulación incontrolada de estos subproductos genera problemáticas de índole ambiental en las zonas rurales y semiurbanas, manifestadas en la proliferación de fauna nociva, la emisión de olores desagradables y la saturación del suelo agrícola.

Paralelamente, México cuenta con una profunda riqueza biocultural en la elaboración de bebidas fermentadas artesanales, donde resalta el tepache. Esta bebida se obtiene mediante la fermentación espontánea de las cáscaras de piña adicionadas con piloncillo en agua. Sin embargo, su producción tradicional adolece de controles sanitarios estrictos, carece de estandarización en sus parámetros fisicoquímicos y posee una vida de anaquel reducida, limitando su comercialización formal. Por otro lado, el kéfir de agua representa un consorcio simbiótico ancestral de bacterias ácido-lácticas, bacterias ácido acéticas y levaduras incustradas en un matriz de polisacáridos reconocido por sus sobresalientes propiedades antimicrobianas y digestivas.

TEORÍA

La fermentación del tepache y del kéfir de agua involucra complejos mecanismos bioquímicos coordinados por consorcios microbianos específicos. En el tepache tradicional, la fermentación se inicia de manera natural por la microbiota epífita presente en la cáscara de la piña, donde intervienen especies de levaduras y bacterias que transforman la sacarosa del piloncillo en etanol, dióxido de carbono y ácidos orgánicos. Se reporta el aislamiento de cepas con propiedades probióticas notables en esta bebida tradicional mexicana, tales como Lactobacillus lactis, Enterococcus faecium y Lactobacillus pentosus, las cuales demuestran una elevada tolerancia al tránsito gastrointestinal y capacidad para sintetizar péptidos con actividad antimicrobiana.

Por su parte, el kéfir de agua constituye un ecosistema microbiano estrictamente simbiótico estructurado en gránulos gelatinosos y translúcidos. La matriz estructural está compuesta por un homopolisacárido denominado dextrano (α-1,6-glucano), sintetizado principalmente por la bacteria Lactobacillus hilgardii a partir de la ruptura de la sacarosa. A diferencia del kéfir de leche, cuya matriz se compone del heteropolisacárido kefirán y metaboliza lactosa, el kéfir de agua se encuentra adaptado para la hidrólisis eficiente de azúcares simples y disacáridos como la sacarosa.

La acumulación controlada de ácido láctico y ácido acético disminuye el pH del medio, confiriéndole a la bebida una alta estabilidad microbiológica al generar un entorno hostil para el desarrollo de microorganismos patógenos comunes como Salmonella sp., Escherichia coli y Staphylococcus aureus.

El valor funcional e industrial de la piña (Ananas comosus) se fundamenta en su perfil químico y en la presencia de la bromelina, una enzima proteolítica del grupo de las cisteín-proteasas. Esta enzima cataliza la hidrólisis de enlaces peptídicos, confiriendo propiedades antiinflamatorias y digestivas que potencian el efecto benéfico de los probióticos. Cuando la pulpa es sometida a un tratamiento térmico

o cocción durante la elaboración de subproductos, las macromoléculas sufren transformaciones estructurales irreversibles. Entre ellas, los azúcares reductores (glucosa y fructosa) experimentan reacciones de caramelización y pardeamiento no enzimático (Reacción de Maillard), generando compuestos volátiles furánicos y polímeros complejos denominados melanoidinas, responsables del perfil organoléptico oscuro y del aroma dulce de la salsa gourmet. Asimismo, la deshidratación térmica de la corona a 60°C reduce la actividad de agua (aw), deteniendo la degradación enzimática provocada por la polifenoloxidasa y asegurando la preservación de los compuestos antioxidantes y de la fibra dietética insoluble (celulosa y lignina) del tejido vegetal

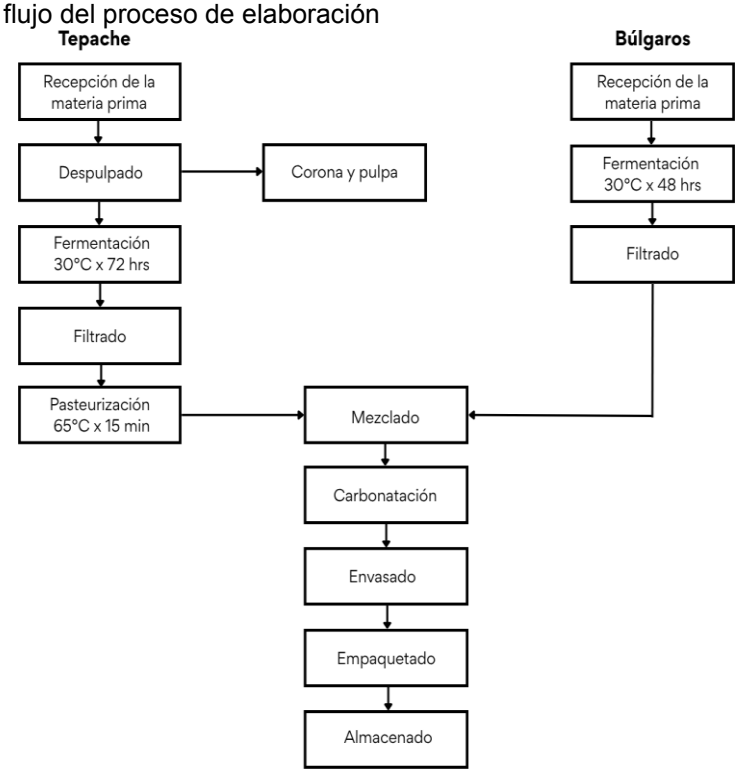
PARTE EXPERIMENTAL

El proceso de elaboración se dividió en tres etapas fundamentales controladas operacionalmente:
Obtención del Tepache Base: Se seleccionaron y trocearon cáscaras de piña madura (3–5 cm). Posteriormente, se preparó una solución de piloncillo en agua purificada y se mezcló con las cáscaras en un recipiente de vidrio esterilizado, utilizando una formulación de 21.52% cáscaras, 3.98% piloncillo y 72.46% agua

Obtención del Agua de Búlgaros: Los gránulos activos de kéfir de agua (1.81% de la formulación total) se enjuagaron con agua destilada y se inocularon en un matraz estéril conteniendo una solución acuosa de piloncillo al 5.2% p/v. El sistema se mantuvo en fermentación a 30°C durante 48 horas bajo una cubierta textil transpirable. Posterior a la fermentación, los gránulos de polisacárido se separaron mediante un tamiz plástico estéril para recuperar la fracción líquida (agua de kéfir) libre de biomasa celular.

Formulación Final y Carbonatación: El tepache filtrado se pasteurizó a 65 °C durante 15 minutos y se enfrió rápidamente para garantizar su inocuidad. Después, se mezcló con agua de búlgaros filtrada, se enfrió hasta 1 °C y se sometió a carbonatación mediante la inyección de CO_2 a presión para obtener de 2 a 3 volúmenes de gas disuelto.

Figura 1.
Diagrama de flujo del proceso de elaboración



Análisis fisicoquímicos

Las determinaciones analíticas de sólidos solubles totales (°Brix) y pH permitieron monitorear la actividad metabólica de los consorcios microbianos y el impacto termodinámico del proceso de carbonatación forzada en la bebida.

Análisis microbiológicos
Los ensayos microbiológicos realizados en el laboratorio de control de calidad arrojaron un cumplimiento absoluto de los estándares sanitarios obligatorios establecidos por la NOM-218-SSA1-2011.
Análisis sensorial
El análisis sensorial consistió en la evaluación de las características organolépticas (sabor y consistencia) del producto por parte de 50 jueces evaluadores

RESULTADOS

Evaluación fisicoquímica

Tabla 1.
Comportamiento físico-químico de las fracciones y mezcla final del producto.

Etapa del Proceso	Sólidos Solubles Totales (°Brix)	Potencial de Hidrógeno (pH)
Tepache base filtrado (72 h)	23.5	6.5
Agua de búlgaros filtrada	20.3	5.7
Mezcla líquida pre-carbonatación	17.3	6.0
Bebida carbonatada final	19.6	3.0

El valor de sólidos solubles inicial en el tepache base (23.5 °Brix) constata la elevada disponibilidad de carbohidratos fermentables derivados de la degradación del piloncillo y los azúcares endógenos de la fruta. Al realizar la mezcla volumétrica con el agua de búlgaros (20.3°Brix), se observó un descenso por dilución matemática hasta alcanzar 17.3 °Brix. Posterior a la operación de carbonatación, se detectó un incremento instrumental en la lectura refractométrica situándose en 19.6 °Brix. Este fenómeno responde a la distorsión del índice de refracción del fluido ocasionado por la alta densidad del dióxido de carbono molecular disuelto intermitentemente en la matriz acuosa del refractómetro digital.

Con respecto al pH, el tepache crudo arrojó un valor inusualmente alto de 6.5, señal analítica de una baja producción espontánea de ácido acético o una detención temprana de la fermentación silvestre. No obstante, tras someter el producto al proceso de inyección de gas a baja temperatura (1°C), el pH experimentó un descenso drástico hasta un valor estabilizado de 3.0.

El pH marcadamente ácido actúa en sinergia con el método de conservación por refrigeración, inhibiendo la viabilidad celular de bacterias esporuladas patógenas y garantizando la estabilidad física y microbiológica del producto durante su almacenamiento.

Evaluación Microbiológica del Producto Terminado

Tabla 2.
Resultados de análisis microbiológicos aplicados a la bebida carbonatada. (* Nota: Excluyendo la microbiota benéfica probiótica viable de kéfir).

Parámetro Microbiológico	Especificación de la Norma (NOM-218)	Resultado Obtenido	Estatus Sanitario
Organismos Coliformes Totales	10 NPM/ml	0 NMP/ml	Cumple
Coliformes Fecales	n.a	Ausencia	Cumple
Bacterias Mesófilas Aerobias	Máximo 50 NMP/ml	6 NPM/ml *	Cumple

La ausencia de crecimiento de colonias típicas rojas con halo rosado en el medio selectivo Agar RVBA demostró la efectividad de las operaciones de desinfección de la materia prima,la pasteurización del tepache y la manipulación bajo condiciones de estricta de higiene durante el envasado. El conteo residual mínimo de mesófilos aerobios no patógenos reafirma la idoneidad del tratamiento térmico aplicado y asegura una óptima vida de anaquel bajo refrigeración.

Análisis sensorial

Figura 2.
Resultados de evaluación sensorial (consistencia)



Figura 3.
Resultados de evaluación sensorial (sabor)



CONCLUSIONES

La transformación biotecnológica de la cáscara de piña mediante fermentación con kéfir de agua permitió obtener una bebida carbonatada con características sensoriales agradables y parámetros de calidad adecuados. Esta propuesta demuestra el potencial de los subproductos agroindustriales como materia prima para el desarrollo de bebidas funcionales sostenibles, contribuyendo a la reducción de residuos, al aprovechamiento integral de recursos y al fortalecimiento de la economía circular en la industria alimentaria.

Se demostró de manera contundente la viabilidad técnica del desarrollo de la bebida funcional carbonatada a través de la estandarización experimental de las operaciones de fermentación, pasteurización térmica y carbonatación a baja temperatura, se logró obtener un producto que cumple rigurosamente con los límites microbiológicos dictados por la NOM-218-SSA1-2011, resolviendo las deficiencias de inocuidad y la inestabilidad fisicoquímica que limitan a las bebidas fermentadas tradicionales en el mercado formal.

El monitoreo analítico evidenció que los cambios del pH hasta un valor estable de, inducida por la formación de ácido carbónico y la actividad metabólica sinérgica de las bacterias del kéfir de agua, confiere al producto una barrera protectora natural idónea frente al deterioro microbiano. Asimismo, el exitoso aprovechamiento biotecnológico de los residuos orgánicos de la piña comprueba que es factible mitigar de forma directa el impacto ambiental negativo de los desechos agrícolas de la Costa Grande de Guerrero, generando simultáneamente tres flujos independientes de valor comercial agregado. Se concluye que el modelo desarrollado representa una pauta innovadora transferible para la industria regional de alimentos funcionales con base sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ana Moretti, M. M.-P., "Kéfir de agua, una bebida fermentada que contiene microorganismos probióticos: De la fabricación ancestral y artesanal a la comercialización industrializada y regulada", Food Research International, Vol. 156, 2, 2022, pp. 111-125.
2. Axayacatl, O., "Estadísticas de producción de piña en México", Blog Agricultura, Vol. 12, 4, 2023, pp. 45-49.
3. Badui, S., Química de Alimentos (Pearson Educación, México, DF, 2013), Capítulo 3, pp. 145-189.
4. Diario Oficial de la Federación, "NORMA Oficial Mexicana NOM-218-SSA1-2011, Productos y servicios. Bebidas saborizadas no alcohólicas, sus congelados, productos concentrados para prepararlas y bebidas adicionadas con cafeína", Secretaría de Salud, México, 2011, pp. 1-24.
5. Wilbert Gutiérrez-Sarmiento, B. P.-O.-G.-A.-C.-V., "Estructura de la comunidad microbiana, características fisicoquímicas y funcionalidades predictivas de la bebida fermentada tepache mexicana", Microbiological Research, Vol. 260, 1, 2022, pp. 125-141.

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE HARINA DE SEMILLA DE GUAYABA (*Psidium Guajava* L.): RESIDUO AGROINDUSTRIAL

Aline Alicia Mendoza Diaz, Jennifer Tapia Vázquez, Consuelo de Jesús Cortés Penagos, Berenice Yahuaca Juárez, José Herrera Camacho.

Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán. México.
consuelo.cortes@umich.mx

RESUMEN

La industria procesadora de guayaba genera cantidades significativas de residuos sólidos, principalmente semillas, que representan un desafío ambiental pero también una oportunidad de valorización. En el marco de la economía circular, el aprovechamiento de estos subproductos para la obtención de ingredientes funcionales constituye una estrategia sostenible con potencial aplicación en la industria alimentaria. La semilla de guayaba es reconocida por contener compuestos fenólicos con actividad antioxidante, los cuales pueden contribuir al desarrollo de alimentos con propiedades bioactivas. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad antioxidante de harina obtenida a partir de semilla de guayaba provenientes de residuos de la industria de dulces, jugos y jaleas, de la empresa AGRINOVA. Las semillas se sometieron a secado y molienda para la obtención de harinas, con diferente tamaño de partícula. A los lotes de harina, se les determinó: el contenido de polifenoles totales, expresado como porcentaje equivalente de ácido gálico, y la evaluación de la actividad antioxidante mediante los ensayos de captura de radicales libres DPPH y ABTS, expresando los resultados como porcentaje de inhibición. Los resultados presentaron diferencias entre lotes en el contenido de polifenoles totales y en el porcentaje de inhibición del radical DPPH. Estas variaciones sugieren una heterogeneidad en la concentración y/o disponibilidad de compuestos fenólicos, posiblemente asociada condiciones de procesamiento (tamaño de partícula). La variación observada en el ensayo DPPH indica diferencias en la capacidad de los extractos para donar hidrógeno o electrones y neutralizar radicales libres estables, mecanismo estrechamente relacionado con la presencia de compuestos fenólicos reactivos. En contraste, el comportamiento frente al radical ABTS mostró menor variabilidad entre las harinas. Las posibles discrepancias entre los resultados de DPPH y ABTS pueden explicarse por diferencias en la estructura química, polaridad y grado de interacción de los compuestos fenólicos con la matriz fibrosa de la semilla. Desde una perspectiva estructural, la alta proporción de fibra lignocelulósica presente en la harina puede influir en la extracción y disponibilidad de compuestos fenólicos, ya que una fracción de estos puede encontrarse unida a la pared celular. Esta interacción podría limitar parcialmente su accesibilidad, afectando la magnitud de la actividad antioxidante determinada por ciertos métodos. En conclusión, la harina de semilla de guayaba presenta actividad antioxidante relevante, con diferencias entre lotes principalmente en el contenido de polifenoles totales y en la capacidad de inhibición del radical DPPH. Estos resultados respaldan el potencial de este subproducto agroindustrial como fuente de compuestos bioactivos, promoviendo su valorización como ingrediente funcional en el desarrollo de alimentos con valor agregado.

INTRODUCCIÓN

La creciente generación de residuos agroindustriales derivados del procesamiento de frutas ha impulsado la búsqueda de estrategias orientadas a su aprovechamiento integral, en concordancia con los principios de la economía circular y la sostenibilidad alimentaria. Entre estos subproductos, las semillas de frutas representan una fuente importante de compuestos bioactivos que frecuentemente permanecen subutilizados o son descartados durante los procesos industriales. En el caso de la guayaba *(Psidium guajava* L.), la elaboración de jugos, néctares, purés y otros productos procesados genera cantidades considerables de semillas que constituyen una fracción residual de alto potencial para el desarrollo de ingredientes funcionales (Kumar et al., 2022). El

interés por la valorización de semillas provenientes de frutas ha aumentado significativamente durante los últimos años debido a su contenido de compuestos bioactivos, fibra dietaria y antioxidantes naturales, los cuales pueden aprovecharse para la formulación de alimentos funcionales y nutracéuticos (Allaqaband et al., 2022). Diversos estudios han demostrado que las semillas de guayaba contienen compuestos fenólicos, fibra dietaria, proteínas, lípidos y otros metabolitos secundarios con propiedades biológicas relevantes, particularmente actividad antioxidante, lo que las convierte en una alternativa prometedora para la valorización de residuos agroalimentarios.

Los compuestos fenólicos constituyen uno de los grupos de fitoquímicos más importantes presentes en matrices vegetales debido a su capacidad para actuar como agentes reductores, donadores de hidrógeno y secuestradores de radicales libres. Estas propiedades han sido asociadas con efectos benéficos para la salud humana, incluyendo la reducción del estrés oxidativo y la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles (Wang et al., 2020). Sin embargo, una proporción significativa de los compuestos fenólicos presentes en alimentos de origen vegetal se encuentra en forma ligada a componentes estructurales de la pared celular, tales como celulosa, hemicelulosa, lignina y pectinas, lo que limita su extracción y cuantificación mediante métodos convencionales. Estos compuestos fenólicos ligados representan una fracción importante de la capacidad antioxidante total de numerosos alimentos de origen vegetal y pueden liberarse mediante diferentes tratamientos físicos, químicos o biológicos (Acosta-Estrada et al., 2014; Wang et al., 2020). La distribución de estos compuestos dentro de la matriz vegetal puede verse afectada por diversos factores tecnológicos, entre ellos la reducción del tamaño de partícula. Se ha señalado que la molienda favorece el incremento del área superficial específica, facilitando la transferencia de masa durante los procesos de extracción y aumentando la disponibilidad de compuestos bioactivos. No obstante, el efecto de la granulometría no siempre es lineal, debido a que los compuestos fenólicos pueden encontrarse distribuidos de manera heterogénea en las distintas estructuras anatómicas de los tejidos vegetales. En consecuencia, determinadas fracciones obtenidas durante el tamizado pueden concentrar cantidades superiores de compuestos fenólicos y presentar características funcionales diferentes a las observadas en las harinas más finas.

La evaluación de la capacidad antioxidante en matrices vegetales suele realizarse mediante metodologías complementarias como los ensayos ABTS y DPPH, los cuales permiten estimar la capacidad de los extractos para neutralizar radicales libres mediante diferentes mecanismos de reacción. La combinación de estos métodos con la determinación de polifenoles totales proporciona una caracterización más completa del potencial antioxidante de los materiales de origen vegetal y permite establecer relaciones entre la composición fenólica y la actividad biológica observada.

En este contexto, el aprovechamiento de las semillas de guayaba representa una estrategia viable para la obtención de ingredientes funcionales de alto valor agregado a partir de residuos agroindustriales. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del tamaño de partícula y del procesamiento sobre el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante determinada mediante los métodos DPPH y ABTS en diferentes lotes de harina obtenidos a partir de semillas de guayaba frescas, fermentadas, trituradas y residuos derivados del proceso de tamizado. La recuperación de compuestos bioactivos a partir de semillas y otros subproductos agroindustriales se considera actualmente una estrategia clave para promover sistemas alimentarios sostenibles y reducir el desperdicio de alimentos. En este sentido, las semillas de frutas han sido identificadas como fuentes relevantes de polifenoles, flavonoides, carotenoides y otros compuestos con actividad biológica, capaces de contribuir al desarrollo de ingredientes funcionales de alto valor agregado (Allaqaband et al., 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico. En el proceso de obtención de pulpa de guayaba fresca de la empresa AGRINOVA, el fruto es escaldado, y posteriormente se separa de la semilla, misma que se desecha por considerarse residuo de la industria, esta semilla fue recolectada y llevada al laboratorio de

investigación “M.C. Víctor M. Rodríguez A.” de la facultad de Químico-Farmacobiología, UMSNH, para su procesamiento.



Figura 1. Semilla-residuo de guayaba recolectada.

Preparación de la muestra. Se sometieron a deshidratación por flujo de aire caliente, en un deshidratador Hamilton Beach 32100A a 70°C por 6 horas. Para posteriormente someterlos a molienda, en un molino GOLDENWALL HC-700 y tamizados (el tamaño de partícula es variable en cada lote), para finalmente empaquetarlos al vacío con selladora “TKTK Vacuum sealer machine” para su posterior utilización en los diversos análisis para en el presente proyecto.

Lotes: se trabajó con 7 lotes de harina, de diferente tamaño de partícula: las denominadas harina: 0.058928 cm, L-3 HF (harina de semilla fresca); fermentadas y residuos: 0.1016 cm LM-5F, LM-6F (harinas fermentadas), L-6R, L-7R y LM-2R (residuos del tamizado de harinas); y triturados: aprox. 0.1778 cm., L-10T y L-12T.



Figura 2. Deshidratación de las semillas-residuo.



Figura 3. Molienda y tamizado de las semillas-residuo



Figura 4. Sellado al vacío de las harinas.

Determinación de la Capacidad Antioxidante.
Soluciones extractoras (solución madre). Se hicieron 3 repeticiones por muestra. Para la primera extracción se hizo una solución metanólica con 60 ml de agua destilada en 60 ml de metanol, después se pesaron 3 gr de muestra por cada repetición y se agregaron 40 ml de solución metanólica a cada vaso de precipitado forrado de aluminio. Se dejaron reposar por 1 hora 15 minutos (agitando en intervalos de 10 minutos), después se pasaron a tubos falcón forrados de aluminio y se centrifugaron por 10 minutos a 5000 rpm. Se recuperó el sobrenadante en matraces forrados de aluminio y se reservó la muestra sólida del tubo.
Para la segunda extracción se hizo una solución de acetona con 60 ml de acetona y 60 ml de agua destilada. Se hicieron lavados de los tubos con muestra sólida, previamente reservados con 40 ml de la solución acetónica y se pasaron a vasos de precipitado forrados de aluminio

se dejaron reposar por 1 hora y 15 minutos (agitando en intervalos de 10 minutos). Se pasaron a tubos falcón forrados de aluminio y posteriormente se centrifugaron por 10 minutos a 5000 rpm. Se recuperó el sobrenadante en los mismos matraces de la primera extracción y después se agregaron 20 ml de agua destilada a los matraces de las soluciones extractoras para finalmente refrigerar para su posterior uso en las metodologías de capacidad antioxidante.

Polifenoles totales. Se determinó según la metodología descrita por Folin-Ciocalteu, con adaptaciones para la harina de semilla de guayaba. En oscuridad se hicieron 9 tubos en total por cada muestra. Se tomaron 100 µl (0.1 ml) de solución extractora y se colocó en tubo falcón forrado de aluminio. Se adicionaron 7,400 µl (7.4 ml) de agua destilada, seguido de 500 µl (0.5 ml) del reactivo Folin-Ciocalteu, 2000 µl (2 ml) de carbonato de sodio al 20% y se dejó reposar por 2 horas en la oscuridad. Se leyeron absorbancias a 765 nm en un espectrofotómetro UV/Vis, usando agua destilada como blanco. Se reportan los resultados como mg AG/100 g y se hicieron los cálculos con la siguiente ecuación:

$$Y = (0.195)(x) + 0.0241$$

Donde:
Y = absorbancias de las muestras
x= concentración

DPPH. Utilizando la metodología de Brand-Williams, et al (1995). Se tomaron 0.0197 gr de 2,2-difenil-1-picril-hidrazilo (DPPH), se pasó a matraz aforado de 500 ml y se disolvió con solución metanólica 80%. Se realizó en la oscuridad. Se tomaron 3.8 ml de DPPH y se adicionaron 200 µl de solución extractora en tubos Falcon forrados de aluminio, se hicieron las 3 repeticiones. Se realizaron lecturas en espectrofotómetro UV/Vis a 517 nm usando solución metanólica 80% como blanco y se tomaron lecturas de absorbancia a los tiempos 0,1,2,3,4,5,6,30 y 60 minutos. Se reportan resultados como µg/100 g de muestra y porcentaje de inhibición usando la siguiente ecuación:

$$\%\text{Inhibición DPPH} = \frac{(A_{control} - A_{muestra})}{A_{control}} \times 100$$

donde:

$A_{control}$= absorbancia de la solución del radical (DPPH) sin muestra.

$A_{muestra}$= absorbancia de la mezcla radical + extracto de la muestra después del tiempo de reacción

ABTS. Se empleó el método RE y col. 1999 y descrita por Kuskoski y col. 2004. Realizado en la oscuridad. Se realizó una solución de persulfato de potasio 2.45 mM. Fue realizada una proporción 1:1 de ácido 2,2-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS) 7 mmol y persulfato (2.5 ml c/u). Se dejó reposar la mezcla a 4°C por 12-14 horas. Después del reposo se diluyó con etanol hasta obtener una absorbancia de 0.8 a una longitud de onda de 734 nm, el blanco usado fue etanol. Se hicieron por triplicado las muestras. Se tomaron 60 µl de solución extractora y 1940 µl de ión ABTS y se tomaron las lecturas del tiempo 0,1,2,3,4,5 y 6 minutos respectivamente. Se reporta cómo Concentración µM Trolox /100g y % de inhibición con la siguiente ecuación:

$$\%\text{Inhibición ABTS} = \frac{(A_{control} - A_{muestra})}{A_{control}} \times 100$$

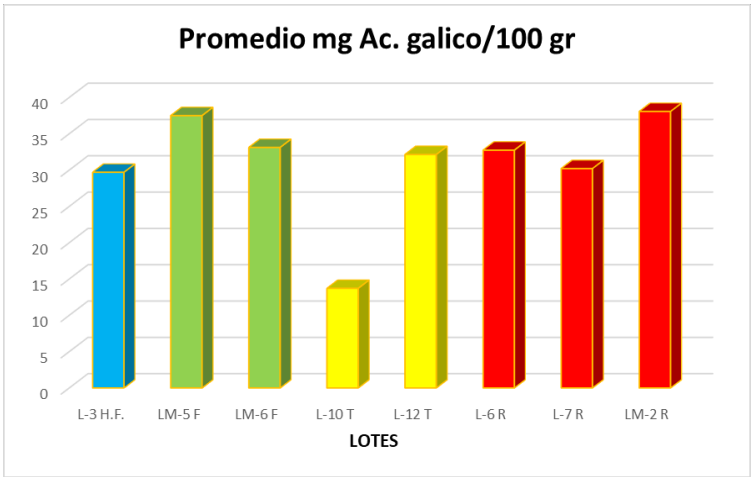
donde:

$A_{control}$= absorbancia de la solución del radical (ABTS) sin muestra.

$A_{muestra}$= absorbancia de la mezcla radical + extracto de la muestra después del tiempo de reacción

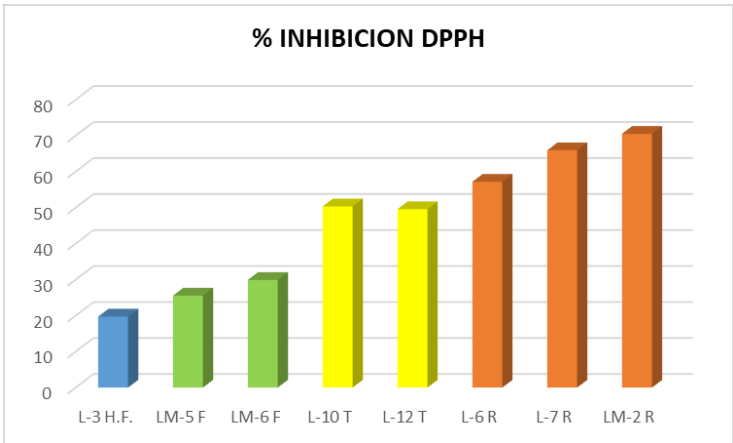
RESULTADOS

El contenido de polifenoles totales se muestra en la Gráfica 1, se observa que no existe una relación directa de este parámetro con tamaño de partícula de las harinas de semilla de guayaba. Aunque la harina fresca con el menor tamaño de partícula (0.058928 cm) presentó un valor de 29.69, los mayores contenidos de polifenoles se registraron en muestras con tamaño intermedio (0.1016 cm), particularmente en LM-2R (38.07) y LM-5F (37.50). Esta dispersión sugiere que otros factores asociados al procesamiento tuvieron un efecto más importante que la granulometría.



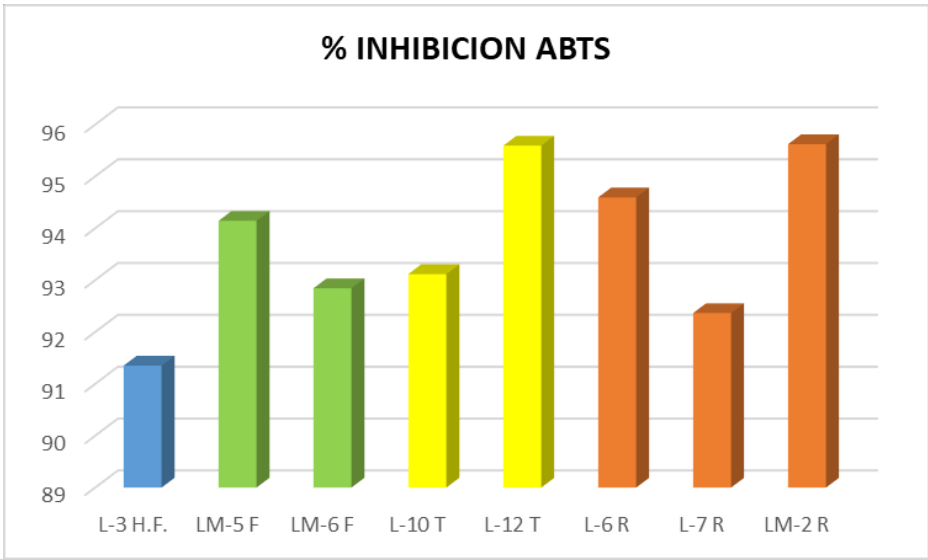
Gráfica 1. Contenido Ácido gálico mg/100 g de muestra, en los diferentes lotes de harina de guayaba

Los resultados de DPPH (% de inhibición) muestran un comportamiento muy diferente al observado para los polifenoles totales, lo cual es bastante interesante desde el punto de vista científico. La harina más fina (L-3HF; 0.058928 cm) presentó la menor actividad antioxidante (19.72%), mientras que los valores más altos se encontraron en residuos de tamizado con tamaño intermedio (0.1016 cm), alcanzando hasta 70.50% de inhibición en LM-2R. Además, las muestras trituradas de mayor tamaño de partícula (0.1778 cm) mostraron actividades antioxidantes relativamente elevadas (≈50%), superiores a las observadas en las harinas fermentadas. Estos resultados indican que la capacidad captadora de radicales libres, medida mediante DPPH no estuvo determinada exclusivamente por el tamaño de partícula. (Gráfica 2).



Gráfica 2. Porcentaje de inhibición de DPPH en harinas de semilla de guayaba.

Los resultados de ABTS muestran un comportamiento distinto al observado para DPPH y para los polifenoles totales. En este caso, todas las muestras presentan una capacidad antioxidante muy elevada, con porcentajes de inhibición superiores al 91%. (Gráfica 3)



Gráfica 3. Porcentaje de inhibición de ABTS en harinas de semillas de guayaba

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante determinada mediante los métodos DPPH y ABTS evidenciaron que la granulometría no fue el único factor que influyó en las propiedades antioxidantes de las harinas de semilla de guayaba. Aunque la reducción del tamaño de partícula suele incrementar la superficie específica disponible para la extracción de compuestos bioactivos, los resultados sugieren que el efecto del procesamiento previo, particularmente la fermentación, la trituración y la separación por tamizado, tuvo una influencia más importante sobre la disponibilidad y actividad de los compuestos antioxidantes presentes en las muestras.

Al analizar conjuntamente los resultados de polifenoles totales, DPPH y ABTS, se observa que la actividad antioxidante de las harinas de semilla de guayaba estuvo influenciada principalmente por la naturaleza de las fracciones obtenidas durante el procesamiento más que por la granulometría en sí misma. Las fracciones residuales derivadas del tamizado destacaron por presentar simultáneamente altos contenidos de polifenoles y elevados porcentajes de inhibición de radicales libres, particularmente en el ensayo DPPH. Este comportamiento sugiere una concentración selectiva de compuestos bioactivos en dichas fracciones, lo que incrementa su valor funcional y su potencial aprovechamiento como ingrediente alimentario rico en antioxidantes.

El procesamiento a gran escala de la guayaba en diversos productos genera una gran cantidad de semillas como subproductos, creando el problema de la eliminación de residuos. En particular, el procesamiento de una tonelada métrica de guayabas produce aproximadamente 80 kg de residuos (Kumar M. et al, 2022). Ante la necesidad de gestionar los residuos frutales de la industria procesadora y reducir el impacto ambiental resultante, se han formulado estrategias para recuperar las semillas de guayaba y aprovecharlas en la industria alimentaria y otras industrias.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta-Estrada, B. A., Gutiérrez-Uribe, J. A., & Serna-Saldívar, S. O. (2014). *Bound phenolics in foods: A review*. Food Chemistry, 152, 46–55. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.093
2. Kumar, M., Kapoor, S., Dhumal, S., Tkaczewska, J., Changan, S., Saurabh, V., et al. (2022). *Guava (Psidium guajava L.) seed: A low-volume, high-value byproduct for human health and the food industry*. Food Chemistry, 386, 132694. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132694
3. Wang, Z., Li, S., Ge, S., & Lin, S. (2020). *Review of Distribution, Extraction Methods, and Health Benefits of Bound Phenolics in Food Plants*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 68(11), 3330–3343. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06574
4. Allaqaband, S., Dar, A. H., Patel, U., Kumar, N., Nayik, G. A., Khan, S. A., et al. (2022). *Utilization of Fruit Seed-Based Bioactive Compounds for Formulating the Nutraceuticals and Functional Food: A Review*. Frontiers in Nutrition, 9, 902554. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.902554

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIODIGESTOR

Nahomy Aidet Domínguez Ramírez[1], Dulce María Rivera Altamirano[1], Ashley Dayan Prado Balderas[1], Luis Alfredo Martínez Lagos[1], María Teresa Fuentes Romero[2], Jesús Nicolás Bermúdez[2], Rodrigo Salazar Salazar[2], Aarón Sabastian Galván Luis[3].

[1]Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, [2]Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, Cuerpo Académico. [3]Nacobre.
24323034@utfv.edu.mx

RESUMEN

El cambio climático y el acelerado agotamiento de los combustibles fósiles han generado una crisis ambiental y energética de gran relevancia a nivel global que exige la transición inmediata hacia alternativas sostenibles. En este contexto, la producción de biogás a partir de biomasa destaca como una solución de doble impacto: permite la gestión eficiente de los residuos orgánicos y genera energía renovable de bajo costo. El presente trabajo tiene como objetivo principal diseñar, construir y evaluar un sistema de producción de biogás mediante un biodigestor anaerobio casero de bajo costo utilizando materiales accesibles, con el fin de reducir el impacto ambiental y fomentar el uso de energías limpias en entornos domésticos y rurales. Se establece como hipótesis que es posible crear un biodigestor eficiente y hermético que permita procesar la biomasa bajo condiciones aceptables y diferenciar la productividad obtenida a partir de dos tipos de biomasa fecal (cerdo y vaca). Para la evaluación del rendimiento de los sustratos, se midió la composición química del gas generado mediante un equipo analizador de gases, obteniendo para el metano (CH_4) un porcentaje en masa del 54-62% y para el dióxido de carbono (CO_2) un porcentaje entre el 24-38%. De las materias primas analizadas, el estiércol de cerdo presentó la mayor velocidad de degradación y eficiencia en la conversión energética debido a su alta carga microbiológica nativa. Los resultados demuestran de manera exitosa que la implementación de estos sistemas a pequeña escala es viable y constituye una alternativa real para disminuir la dependencia de fuentes energéticas tradicionales y valorizar los subproductos como biofertilizantes de alta calidad.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cambio climático representa una de las problemáticas más críticas y complejas a nivel mundial, impulsada principalmente por el uso desmedido de combustibles fósiles y la acumulación descontrolada de residuos orgánicos urbanos y agropecuarios. Esta situación genera altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y acelera la degradación de los ecosistemas locales. La necesidad apremiante de transitar hacia esquemas energéticos más limpios y sustentables ha posicionado a la biomasa como un recurso estratégico de alto potencial energético. La producción de biogás mediante procesos de digestión anaerobia representa una alternativa de economía circular de gran relevancia, especialmente para las comunidades rurales y suburbanas en México. Esta tecnología no solo mitiga la contaminación ambiental derivada de la mala disposición de los desechos ganaderos y domésticos, sino que transforma un pasivo ambiental en un activo energético útil (calor y electricidad) y en un subproducto estabilizado rico en nutrientes conocido como digestato, aplicable como mejorador de suelos. A pesar de las evidentes ventajas ambientales y socioeconómicas del biogás, el acceso a tecnologías comerciales en el mercado mexicano está limitado debido a los elevados costos de adquisición, instalación especializada y la falta de esquemas de transferencia tecnológica orientados al sector doméstico o de pequeña escala. El presente proyecto aborda esta problemática mediante la propuesta de diseñar, construir y evaluar un prototipo de biodigestor casero que funcione a base de biomasa, optimizando su arquitectura con materiales comerciales de plomería y contenedores plásticos estándar de fácil acceso y bajo costo, garantizando en todo momento las condiciones operacionales de anaerobiosis. El documento se encuentra estructurado metodológicamente en secciones clave: en la sección de Teoría se detallan los fundamentos microbiológicos y las fases de la digestión anaerobia; en la Parte Experimental se

describe la configuración del biorreactor, las modificaciones técnicas instrumentadas en cobre para mejorar la durabilidad del sistema y las pruebas de hermeticidad; en la sección de Resultados se discute cuantitativamente la composición del biogás y la eficiencia comparativa de los sustratos estudiados; y finalmente, en las Conclusiones se contrasta la viabilidad del sistema frente a las alternativas industriales disponibles en el mercado nacional.

TEORÍA

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4) en un rango del 50% al 70%, dióxido de carbono (CO_2) entre un 30% y 45%, y trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y óxidos de nitrógeno (NO_X). La generación controlada de este biocombustible ocurre en reactores herméticos mediante la digestión anaerobia, un proceso microbiológico complejo que se lleva a cabo en estricta ausencia de oxígeno disuelto y molecular, estructurado en cuatro etapas consecutivas e interdependientes catalizadas por distintos consorcios bacterianos y arqueas específicas.

Fases bioquímicas de la digestión anaerobia

Hidrólisis: En esta etapa inicial, los compuestos orgánicos complejos de alto peso molecular (como proteínas, carbohidratos y lípidos presentes en la biomasa) son solubilizados y fragmentados por enzimas extracelulares (celulasas, amilasas, proteasas) segregadas por bacterias hidrolíticas, transformándolos en compuestos más simples como aminoácidos, monosacáridos y ácidos grasos.

Acidogénesis: Los monómeros resultantes de la hidrólisis son absorbidos por las bacterias acidogénicas y convertidos en ácidos grasos volátiles de cadena corta (ácido acético, propiónico, butírico), alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno molecular.

Acetogénesis: En esta fase, los productos de la acidogénesis que no pueden ser metabolizados directamente por las arqueas metanogénicas son transformados por las bacterias acetogénicas en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Esta etapa requiere un control estricto de las presiones parciales de hidrógeno en el medio para permitir la termodinámica favorable de las reacciones.

Metanogénesis: Es la fase final y la más sensible del proceso. Las arqueas metanogénicas (acetoclásticas e hidrogeno tróficas) transforman el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano y agua, completando la estabilización de la materia orgánica. El rendimiento estequiométrico global de la conversión de glucosa a metano puede expresarse de manera simplificada mediante la siguiente ecuación generalizada de Buswell:

$$C_n H_a O_b + (n - a/4 - b/2)H_2 O \rightarrow (n/2 + a/8 - b/4)CH_4 + (n/2 - a/8 + b/4)CO_2 \qquad (1)$$

Factores operacionales críticos.

La eficiencia metabólica de las bacterias anaerobias depende directamente de variables operacionales estrictas. La temperatura óptima de operación para un régimen mesofílico se sitúa entre 20°C y 35°C; variaciones bruscas de temperatura pueden inhibir por completo al microbiota metanogénico. La carga orgánica de diseño debe mantener un equilibrio estricto en la relación de nutrientes, principalmente la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), idealmente en un rango de 25:1 a 30:1. Un exceso de nitrógeno genera acumulación de amoníaco libre (NH_3), un potente inhibidor celular. Asimismo, trazas de metales pesados o altas concentraciones de sulfuros actúan como agentes tóxicos, desestabilizando el pH del sistema e interrumpiendo la producción gaseosa.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el desarrollo práctico del proyecto, se diseñó y construyó un prototipo de biodigestor anaerobio doméstico de bajo costo y flujo discontinuo (batch), tomando como referencia base el modelo de

tambor plástico automatizado y adaptándolo con mejoras técnicas en la conducción gaseosa y en el control de la hermeticidad del sistema.

Componentes y ensamblaje del sistema.

El biorreactor se fabricó utilizando como cuerpo principal un contenedor cilíndrico de polietileno de alta densidad con una capacidad volumétrica neta de 120 a 220 litros (Componente 3). En la sección superior se instaló una tapa de entrada de carga roscada de 3 pulgadas (Componente 1) provista de empaques de neopreno para el sellado hermético. Conectado a esta sección, se prolongó un tubo de PVC sanitario de 3 pulgadas hacia el fondo del tanque (Componente 2), actuando como un sello hidráulico para evitar el ingreso accidental de aire durante las operaciones de alimentación y muestreo.

Para la regulación del nivel del líquido y la evacuación del efluente estabilizado (digestato), se instaló una tubería niveladora de PVC de 2 pulgadas en el tercio superior del tanque (Componente 4). En la base cónica inferior del contenedor, se acopló una válvula de bola de PVC de 1 pulgada (Componente 5) encargada de la purga de lodos pesados y la limpieza interna periódica.

La conducción del biogás generado se estructuró a partir de una modificación técnica crítica: se sustituyó la conexión plástica convencional por una válvula de retorno modificada mediante un tramo de tubo de cobre de 1/2 pulgada de diámetro comercial (Componente 6). Esta modificación incrementa de manera sustancial la resistencia mecánica ante variaciones de presión interna y proporciona una barrera térmica de alta seguridad mecánica contra posibles deformaciones por radiación solar directa o calor en zonas próximas al punto de consumo, en estricto cumplimiento con criterios de durabilidad estructural.

El flujo gaseoso se transporta a través de una manguera flexible de alta densidad de 3/8 de pulgada (Componente 7) hacia un conector tipo "T" de distribución (Componente 8). Este nodo bifurca la línea hacia un sistema de almacenamiento flexible constituido por una cámara de neumático automotriz modificada (Componente 11) que actúa como pulmón acumulador de baja presión, y hacia la línea de descarga final (Componente 9) controlada por una válvula de paso de seguridad aguja (Componente 10) acoplada a un dispositivo de combustión o quemador experimental (Componente 12).

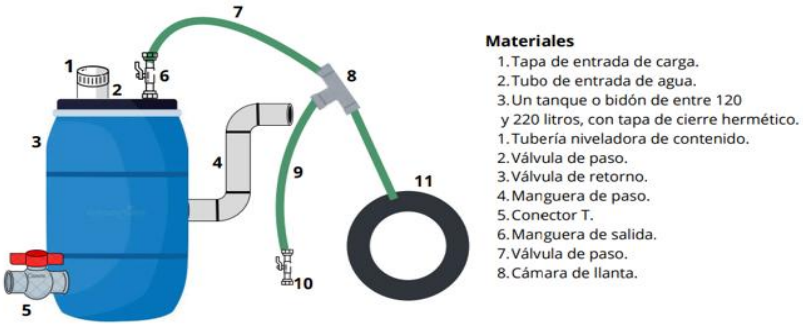


Figura 1. Diagrama analítico y estructural del prototipo de biodigestor casero y sus conexiones funcionales

Protocolo de operación y pruebas de hermeticidad

Previo al proceso de inoculación y carga activa, se implementó un protocolo riguroso de control de calidad estructural para asegurar la estanqueidad absoluta del biorreactor. El sistema se llenó en su totalidad con agua a presión atmosférica constante y se inyectó aire comprimido de forma moderada hasta alcanzar una presión manométrica de 0.05 bar. Se aplicó una solución tensoactiva concentrada (agua y jabón neutro) en cada una de las uniones roscadas, bridas de PVC, soldaduras de cobre y

acoples de mangueras, verificando minuciosamente la ausencia total de burbujas superficiales (fugas microestructurales).

Una vez aprobada la validación de hermeticidad, se procedió con el protocolo de carga inicial del sistema. Para cada lote experimental se preparó una mezcla homogénea constituida por un 50% en volumen de agua tibia (mantenida en un rango térmico de 25°C -30°C para disminuir el choque metabólico) y un 50% de la biomasa orgánica bajo estudio. Se evaluaron de forma independiente dos tratamientos diferenciados: Estiércol de Cerdo y Estiércol de Vaca. Durante el periodo de incubación anaerobia, se prohibió estrictamente la introducción de agentes acidificantes como residuos cítricos, aceites vegetales lubricantes, materia ósea o tejidos cárnicos, con la finalidad de evitar la sobrecarga ácida o la putrefacción aerobia paralela.

RESULTADOS

El monitoreo analítico del rendimiento de producción de biometano y la composición química cuantitativa de la fase gaseosa se extendió por un periodo de retención hidráulica de 35 días. La caracterización fina de los componentes del biogás se realizó empleando un equipo analizador de gases portátil calibrado con sensores infrarrojos para CH_4 y CO_2 y sensores electroquímicos de precisión para gases traza.

Análisis comparativo de la biomasa utilizada.

Los datos cinéticos recopilados evidenciaron diferencias significativas entre ambos sustratos biológicos. El estiércol de cerdo presentó una eficiencia superior en la velocidad de metanogénesis y una mayor estabilidad operativa a lo largo de las semanas de evaluación. Este comportamiento favorable se atribuye directamente a la alta densidad de microorganismos anaerobios presentes de forma nativa en el tracto digestivo de los porcinos y a una baja concentración de material lignocelulósico de difícil degradación, en comparación con los residuos bovinos.

Tipo de Biomasa	Características Reológicas y Biológicas del Sustrato	Contenido de Metano (CH_4) %	Contenido de Dióxido de Carbono (CO_2) %
Estiércol de Cerdo	Elevado contenido de materia orgánica soluble, alta densidad de inóculo bacteriano nativo y rápida hidrólisis celular.	58% – 62%	24% – 32%
Estiércol de Vaca	Alta disponibilidad local, degradación moderada y presencia de macromoléculas complejas de origen lignocelulósico.	50% – 55%	30% – 38%

Tabla 1. Evaluación analítica comparativa de la composición del biogás según el origen de la biomasa

A partir del promedio ponderado de las corridas experimentales estabilizadas, se determinó que la composición global media del biogás generado por el sistema casero se encuentra constituida por un 54% a 62% de metano (CH_4), un 24% a 38% de dióxido de carbono (CO_2) y una fracción remanente de gases traza (principalmente H_2S y vapor de agua) que oscila entre el 2% y el 5%. Estos rangos porcentuales confirman de manera robusta la calidad del combustible obtenido, situándolo plenamente dentro de los parámetros estándar reportados en la literatura científica para aplicaciones de combustión directa en cocinas domésticas y sistemas de iluminación rural sin requerir etapas complejas de purificación industrial.

CONCLUSIONES

El desarrollo integral de este proyecto permitió validar con éxito la viabilidad técnica y operativa de un sistema de producción de biogás de pequeña escala. Se cumplieron de forma satisfactoria los

objetivos generales y específicos orientados al diseño y construcción de una infraestructura funcional empleando materiales de bajo costo y alta accesibilidad local. La hipótesis planteada inicialmente fue confirmada: es posible estructurar un biorreactor casero eficiente capaz de mantener condiciones de hermeticidad y anaerobiosis estables, permitiendo la transformación efectiva de residuos orgánicos en energía renovable y estableciendo una clara diferenciación en el rendimiento de los sustratos, donde el estiércol de cerdo demostró ser la biomasa más eficiente y con mayor velocidad de conversión biológica. Al contrastar los resultados del prototipo desarrollado frente a las alternativas de biodigestores comerciales disponibles en el mercado mexicano (como los sistemas distribuidos por Rotoplas o Tecnotanques en cadenas comerciales como The Home Depot), se identifican importantes ventajas operacionales y de accesibilidad. Si bien las unidades industriales ofrecen ventajas asociadas a materiales de polietileno de alta densidad estabilizado, sistemas de filtrado avanzados y mecanismos autolimpiables de lodos que minimizan los requerimientos de mantenimiento, sus elevados costos económicos representan una barrera de entrada infranqueable para la mayoría de las micro explotaciones agropecuarias y familias en sectores rurales vulnerables. En contraparte, el biodigestor casero destaca por su extrema viabilidad económica, facilidad de autoconstrucción y mantenibilidad descentralizada a partir de repuestos locales comerciales de bajo costo. Como líneas de investigación y desarrollo para trabajos posteriores, se propone integrar sistemas de control analítico de bajo costo basados en hardware abierto (como sensores micro controlados de metano y temperatura) para automatizar el monitoreo operativo sin incrementar drásticamente el costo final. Asimismo, resulta estratégico profundizar en el análisis agronómico del digestato líquido y sólido generado, evaluando su efectividad real como biofertilizante orgánico sustituto de agroquímicos comerciales, cerrando así un ciclo integral de sustentabilidad energética y ambiental aplicable al desarrollo rural.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chen, L., & Li, Q., “Applications of biogas in sustainable energy systems”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 155, 2022, pp. 111-890.
2. Davis, S., Procesos microbianos en la digestión anaerobia, CRC Press, New York, NY, 2018, pp. 45-89.
3. Deublein, D., & Steinhauser, A., Biogas from waste and renewable resources, Wiley-VCH, Weinheim, 2008, pp. 120-165.
4. González, J. L., & García, M. J. (2023). Etapas de la digestión anaerobia. ResearchGate.
5. Huameicarbon. (s. f.). Depuración de biogás. https://www.huameicarbon.com/es/solicitud/depuracion-de-biogas/
6. IPCC. (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. Cambridge University Press.
7. Khan, S., & Ali, Z., “Metanogénesis: La etapa final de la digestión anaerobia”, International Journal of Biogas Research, Vol. 5, No. 1, 2023, pp. 75-89.
8. Smith, J., Energía renovable para un futuro sostenible, Oxford University Press, Oxford, UK, 2020, pp. 210-245

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA Y PROXIMAL DE HOJAS DESHIDRATADAS DE *Psidium Guajava L.* (VARIEDADES CRIOLLA VERDE Y CRIOLLA AMARILLA)

Luz Belen Herrera-Jimenez, Ernesto Alanís -García, Eli Mireya Sandoval-Gallegos, Vania Ivonne Bautista-Pacheco, Quinatzin Yadira Zafra-Rojas y Esther Ramírez-Moreno.

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
he435262@uaeh.edu.mx

RESUMEN

En los últimos años ha aumentado el interés por las plantas debido a sus compuestos bioactivos y su potencial como alimentos funcionales o nutracéuticos. *Psidium guajava* L. (guayaba), es una fruta tropical de gran valor por el fruto que produce. Otros productos de esta planta son las hojas, aportan nutrientes como proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales, así como aceites de gran importancia[1] y algunos antioxidantes como polifenoles (flavonoides, quercetina, miricetina y kaempferol).[2] El aporte nutricional y antioxidante puede contribuir con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antidiabéticas, lo que les confiere potencial en la prevención y tratamiento de enfermedades no transmisibles.[3]

El objetivo de este estudio fue realizar una caracterización fisicoquímica y proximal de las hojas deshidratadas de guayaba (variedades criollas verde y amarilla), así como evaluar su contenido de fibra dietética para su posible aplicación como suplemento con efecto hipoglucemiante.

Las hojas se obtuvieron en Tizayuca, Hidalgo, México, durante el mes de septiembre. Se seleccionaron y desinfectaron, posteriormente se deshidrataron, molieron y tamizaron a un tamaño de partícula de (500 µm). Se determinó propiedades fisicoquímicas (pH, acidez titulable, SST, viscosidad y color), composición químico proximal (proteína, grasa, carbohidratos, humedad, cenizas) y fibra dietética (total, soluble e insoluble) y sus propiedades tecnológicas (CRA, CRL, CRG, CH, CE).

Las hojas deshidratadas de *Psidium guajava L.* (variedades criolla verde y amarilla) presentaron pH de 5.88 y 5.96, acidez titulable de 2.32 y 2.70 %, SST de 2.33 y 3.16 °Brix y viscosidad de 3.66 y 11.91 cP. El color mostró valores de 57.20 y 38.78, -10.08 y -9.95 y 17.73 y 16.04 para las coordenadas *L*, a** y *b**, respectivamente. El análisis proximal reveló un contenido de humedad (9.67 y 10.01 %), de cenizas de 8.5 y 6.7 %, de proteína de 11.71 y 14.23 %, grasa (2.06 y 1.16 %), los carbohidratos totales, calculados por diferencia, representaron el componente mayoritario con alrededor del 68.15 y 68.24 %. El contenido de fibra dietética total fue de 45.72 y 44.65 %. De esta, la fracción soluble representó 7.09 y 18.58 %, mientras que la fibra insoluble constituyó el 38.75 y 26.06 %. Respecto a las propiedades tecnológicas, las muestras presentaron CRA de 0.49 y 0.48 g/g, CRL de 0.49 g/g para ambas variedades, y CRG de 233.40 y 318.83 mg/g. La CH fue de 0.56 y 1.33 %, mientras que la CE alcanzó valores de 26.66 y 24.83 %.

En conclusión, las hojas deshidratadas de *Psidium guajava L.* (variedades criolla verde y amarilla) presentan características fisicoquímicas, proximales y tecnológicas que evidencian su alto potencial como ingrediente funcional, podrían ser valorizadas y aprovecharse en la industria de los alimentos como ingrediente de otros alimentos por su aporte nutricional o como productos funcionales en la industria farmacéutica, por lo que en futuras investigaciones continuaremos con la caracterización antioxidante de estas muestras.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado el interés por las plantas debido a sus compuestos bioactivos y su potencial como alimentos funcionales o nutracéuticos. *Psidium guajava L.*, también conocida

como guayaba es una fruta tropical de un árbol pequeño perteneciente a la familia de los mirtos *(Myrtaceae)* del género *Psidium*, originario de áreas tropicales desde el sur de México hasta el norte de Sudamérica.[4] Es ampliamente apreciada por su excelente perfil nutricional porque contiene; vitamina C, proteína, carbohidratos, fibra y un alto contenido de antioxidantes.[5]

Actualmente, la investigación se ha centrado principalmente en el fruto, extractos o infusiones, dejando de lado el aprovechamiento integral de las hojas deshidratadas. Esto ocurre a pesar de que dichas hojas presentan una notable riqueza de nutrientes esenciales tales como proteínas, carbohidratos, vitaminas y minerales, así como aceites de gran importancia, además de compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides, ácidos fenólicos, ácido ascórbico y fibra dietética.[6] Estos compuestos son conocidos por poseer propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antidiabéticas y antimicrobianas.[7]

Asimismo, estos compuestos contribuyen a la prevención y tratamiento de diversas enfermedades, incluyendo afecciones del sistema respiratorio (resfriado, tos, bronquitis), del sistema digestivo (diarrea, estreñimiento y gastritis) y enfermedades no transmisibles como sobrepeso, obesidad, hipertensión, diabetes mellitus tipo 2 y cáncer.[8-10]

En este contexto, las hojas de Psidium guajava representan una alternativa prometedora como fuente de compuestos funcionales. Por ello, el objetivo de este estudio fue realizar la caracterización fisicoquímica y proximal de hojas deshidratadas de guayaba (variedades criollas verde y amarilla), así como evaluar su contenido de fibra dietética para su posible aplicación como suplemento con efecto hipoglucemiante

TEORÍA

Los alimentos funcionales son aquellos que además de aportar nutrientes esenciales contienen sustancias biológicamente activas capaces de producir efectos metabólicos o fisiológicos demostrados, los cuales ejercen efectos positivos sobre la salud[11] y reducen el riesgo de desarrollar enfermedades no transmisibles; por su parte, un nutracéutico es un suplemento dietético presentado en una matriz no alimenticia (como píldoras, cápsulas, tabletas y polvos) de una sustancia natural bioactiva concentrada, pero que al consumirse en dosis superiores a las habituales puede generar un efecto más favorable sobre la salud que el obtenido mediante el alimento en su forma convencional.[12]

Dentro de los compuestos bioactivos que poseen las hojas de *Psidium Guajava L.*, se encuentra la fibra dietética y los compuestos fenólicos desempeñando un papel fundamental. La fibra dietética se clasifica en soluble e insoluble. La fibra soluble tiene la capacidad de formar soluciones viscosas asociado con la salud metabólica, la regulación inflamatoria, la salud metabólica debido a que disminuye los niveles del colesterol LDL, lo que contribuye a la regulación de los niveles de glucosa en sangre.[13] Por otro lado, la fibra insoluble favorece el tránsito intestinal, ejerciendo un efecto modulador en la microbiota intestinal e incrementando su capacidad de degradar carbohidratos complejos y mejorar la salud digestiva.[14] Ambas fracciones son importantes en la prevención de enfermedades metabólicas como la diabetes mellitus tipo 2, dislipidemia, sobrepeso y obesidad.

Diversos estudios han demostrado que no solo el fruto, sino también las hojas de *Psidium Guajava L.* contienen los cuales poseen importantes propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Según Joseph y Priya[15], tal es el caso de las hojas de guayaba que presentan una elevada concentración de responsables de su actividad antioxidante, antiinflamatoria y antimicrobiana. Gutiérrez y sus colaboradores reportaron que los extractos acuosos de las hojas de guayaba poseen actividad antioxidante debido a la presencia de flavonoides como la quercetina y otros compuestos fenólicos capaces de neutralizar radicales libres.[16] Arima y Danno analizaron la composición de compuestos fenólicos en hojas de guayaba y encontraron que estos metabolitos presentan una fuerte actividad antioxidante e inhiben la peroxidación lipídica.[17]

En relación con la toxicidad oral de las hojas de *Psidium guajava* L., Rodríguez y colaboradores evaluaron la toxicidad aguda de sus extractos mediante el método de la dosis letal media (DL_{50}) y el método de clases de toxicidad aguda, observando ausencia de efectos tóxicos a la dosis límite de 2000 mg/kg; además, estimaron una DL_{50} superior a 5 g/kg en roedores.[18] Por su parte, Butt y colaboradores realizaron un estudio de toxicidad crónica de 90 días, en el que dosis de hasta 200 mg/kg/día resultaron seguras, sin cambios relevantes en parámetros histológicos, hematológicos ni bioquímicos.[19] Luo You y colaboradores realizaron un estudio orientado a evaluar la actividad antioxidante y el potencial efecto antidiabético, los polisacáridos de las hojas de guayaba mostraron una alta capacidad para neutralizar radicales libres (reducción de estrés oxidativo), en ratones con diabetes inducida, el tratamiento con polisacáridos produjo una disminución significativa de la glucosa en ayunas y mejor control del metabolismo de la glucosa.[20] Deguchi y Miyazaki evaluaron el consumo de extracto acuoso de hojas de guayaba en pacientes con alteraciones metabólicas y observaron una reducción significativa en los niveles de glucosa postprandial, atribuida a la inhibición de enzimas digestivas relacionadas con la absorción de carbohidratos.[21]

PARTE EXPERIMENTAL

Las hojas de guayaba (variedades criollas verde y amarilla) fueron recolectadas en Tizayuca, Hidalgo, México, durante el mes de septiembre. Posteriormente, se realizó un proceso de selección y desinfección para asegurar la calidad del material vegetal.

Las muestras (verde y amarilla) fueron sometidas a deshidratación, molienda y tamizado hasta obtener un tamaño de partícula de 500 µm. A partir de estas muestras se evaluaron las propiedades fisicoquímicas incluyendo pH (potenciómetro Hanna Instruments, pH 210 Rumania), acidez titulable (solución estándar de NaOH AOAC,1995), sólidos solubles totales (refractómetro Hangzhou Chincan Trading Co., Ltd., °Brix/ATC FG-113,China), viscosidad (viscosímetro Brookfield DV3T, USA, aguja LV-02) y color (coordenadas *L*, a* y b**, mediante colorímetro portátil Minolta CM-80, 500 SM-508D, Japón). De igual manera se realizó el análisis proximal mediante la determinación de proteína equipo Kjeldahl Gerhardt, KB8, Alemania), grasa (Soxhlet Buchi, B-811, EUA), humedad (horno de secado Oven Scorpion Scientific modelo 168242), cenizas (mufla Furnace 1500, MOD.FD1535M) y carbohidratos totales (por diferencia) así como la cuantificación de fibra dietética total, soluble e insoluble (kit sigma-Aldrich TDF- 100A). Finalmente, se analizaron las propiedades tecnológicas de la fibra, tales como la capacidad de retención de agua (CRA), capacidad de retención de lípidos (CRL), capacidad de retención de glucosa (CRG), capacidad de hinchamiento (CH) y capacidad de emulsificación (CE) empleando una centrífuga Hamilton Bell, VanGuard V6500, EUA) y un lector de microplacas Power Wave XS UV-Biotek,Software Gen5 v. 2.09, EUA.

RESULTADOS

Los resultados de las propiedades fisicoquímicas evaluadas en hojas deshidratadas de guayaba (*Psidium guajava* L.) se presentan en la Tabla 1. En cuanto al pH, las muestras mostraron valores entre 5.88 y 5.93, lo que refleja una variación mínima entre ellas. Es decir, sugiere un bajo contenido de ácidos orgánicos, lo cual favorece que el pH se mantenga relativamente cercano a la neutralidad (pH 7), como han señalado Schiavoni y colaboradores.[22] En comparación con otros estudios, Vergara y colegas[23] reportaron que las hojas de guanábana (*Annona muricata* L.) presentan un pH más ácido, con un valor de 5.51. De manera similar, Parafati y otros autores[24] encontraron que las hojas de mango (*Mangifera indica* L.) exhiben un pH aún más bajo, alrededor de 5.13.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas en hojas deshidratadas de variedades de guayaba (*Psidium guajava* L.)

Parámetro	Criolla verde	Criolla amarilla
pH	5.88 ± 0.11	5.93 ± 0.02
Acidez titulable (% ácido cítrico)	2.32 ± 0.10	2.70 ± 0.09

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas en hojas deshidratadas de variedades de guayaba (*Psidium guajava* L.)

SST (°Brix)	2.33 ± 0.44	3.16 ± 0.16
Viscosidad (cP)	3.66 ± 0.44	11.91 ± 0.22*
Color		
*L**	57.20 ± 0.10	38.78 ± 16.59
*a**	-10.08 ± 0.13	-9.95 ± 0.02
*b**	17.73 ± 0.11	16.04 ± 0.01*

*Indica diferencia significativa (*p<0.05*) entre variedades. Sólidos solubles totales (SST), centipoises (cP)

La acidez titulable registrada en las muestras se situó entre 2.32 y 2.70 %, estos valores resultaron inferiores a los reportados por Salas[25], quien documentó una acidez de 0.37 % en hojas de limón (*Citrus aurantifolia* S.). En contraste, Guevara y colaboradores[26] señalaron contenidos significativamente mayores, alcanzando 5.22 % en hojas de aguacate (*Persea americana*). En relación con los sólidos solubles totales, se obtuvieron valores entre 2.33 y 3.16 °Brix. Estos resultados fueron superiores a los descritos por Ouhammou y colegas[27], quienes reportaron 0.1 °Brix en hojas de azufaifo (*Ziziphus lotus*). No obstante, Sepúlveda y otros autores[28] informaron valores considerablemente más altos, en un intervalo de 8 a 20 °Brix en hojas de achiote (*Bixa orellana* L.), lo que evidencia una amplia variabilidad entre especies vegetales.Por otra parte, la viscosidad presentó un rango de 3.66 a 11.91 centipoises, con valores significativamente mayores ($p<0.05$) en la variedad criolla verde. En comparación, Heredia y colaboradores [29] observaron valores cercanos, de 13.54 centipoises, en hojas de guanábana (*Annona muricata* L.), mientras que Sampath y colegas[30] reportaron cifras superiores, alcanzando 286,450 centipoises en hojas de *Psidium guajava* L. en formulaciones de gelatina.

En cuanto al análisis de color, la variedad criolla verde presentó valores de 57.20, −10.08 y 17.73 para las coordenadas *L*, a* y b**, respectivamente, mientras que la variedad criolla amarilla registró 38.78, −9.95 y 16.04 en las mismas coordenadas. Se observó una diferencia significativa ($p>0.05$) en el parámetro b*, lo que indica variaciones en la intensidad del tono amarillo entre ambas muestras. Los resultados se ilustran en la Figura 1. Asimismo, los valores obtenidos fueron procesados mediante el software EasyRGB[31], con el fin de representar de manera más precisa la percepción de cada muestra.

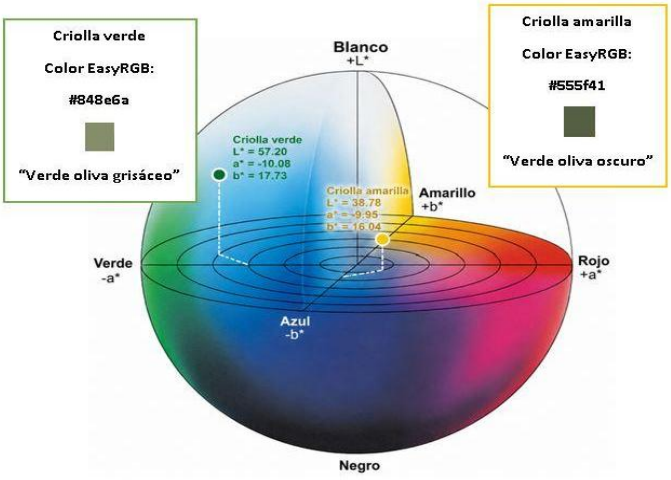


Figura 1. Parámetros de color CIE *L*, a* y b** de las hojas de *Psidium guajava* L.

La variedad criolla verde presentó una tonalidad correspondiente a verde oliva grisáceo, mientras que la variedad criolla amarilla se caracterizó por un verde oliva más oscuro. Esta variación puede atribuirse principalmente al proceso de homogeneización durante la molienda, ya que la ruptura de los tejidos vegetales facilita la liberación de pigmentos naturales, especialmente la clorofila. Asimismo, otros factores influyeron en las diferencias de color observadas, como la temperatura, la deshidratación, la exposición al oxígeno y el tamaño de partícula obtenido tras la molienda.

En la Tabla 2 se presentan las propiedades tecnológicas evaluadas en hojas deshidratadas de *Psidium guajava* L., correspondientes a las variedades criolla verde y criolla amarilla. En relación con la capacidad de retención de agua (CRA), ambas variedades mostraron valores muy similares, con valores de 0.49 g/g para la variedad verde y 0.48 g/g para la amarilla, lo que indica una baja variabilidad entre muestras. Estos resultados fueron inferiores a los reportados por Suthar y otros autores[32], quienes observaron rangos entre 4.91 y 5.87 g/g en harinas elaboradas a partir de hojas de guayaba. Asimismo, Bejar y colaboradores[33] documentaron valores considerablemente más altos de CRA en hojas secas de naranja, alcanzando 7.86 g/g.

Por otra parte, la capacidad de retención de lípidos (CRL) se mantuvo constante en ambas muestras, con un valor de 0.49 g/g, sin diferencias entre variedades. Sin embargo, estos resultados fueron inferiores a los reportados por Lawrence y colegas[34], quienes obtuvieron una CRL de 2.77 g/g, así como por Kaur y otros autores[35], quienes registraron valores aún mayores de 3.67 g/g en hojas de *Mangifera indica* L.

Tabla 2. Propiedades tecnológicas en las hojas deshidratadas de *Psidium guajava* L.

Variedad (criolla)	CRA (g/g)	CRL (g/g)	CRG (mg/g)	CH (mL/g)	CE (mL/g)
Verde	0.49 ± 0.00	0.49 ± 0.00	233.40 ± 0.51	0.56 ± 0.47	26.66 ± 13.01
Amarilla	0.48 ± 0.00	0.49 ± 0.00	318.83 ± 16.08*	1.33 ± 0.44	24.83 ± 5.30

*Indica diferencia significativa (*p<0.05*) entre variedades. Capacidad de retención de agua(CRA), Capacidad de retención de lípidos (CRL), Capacidad de retención de glucosa(CRG), Capacidad de hinchamiento (CH), Capacidad emulsificante (CE), gramos por gramo (g/g), miligramo por gramo mg/g, mililitro por gramo (mL/g).

Por otro lado, la capacidad de retención de glucosa (CRG) mostró diferencias significativas ($p<0.05$) entre las variedades evaluadas, observándose un valor superior en la variedad criolla amarilla (318.83 mg/g) en comparación con la variedad criolla verde (233.40 mg/g). Estos resultados se encuentran en un rango cercano a los reportados por Ngo y colaborades[36], quienes documentaron una CRG entre 0.8 y 2.7 mmol/g, equivalentes a 144.13 y 486.43 mg/g en hojas de mango (*Mangifera indica* L.). De manera similar, Wang y colegas[37] describieron valores cercanos de CRG en hojas de fresa china (*Myrica rubra*), con un intervalo de 1.12 a 16.15 mmol/g equivalentes a 201.78 a 2919.58 mg/g, por lo que pudiera ser utilizado en suplementos con efecto hipoglucemiante.

En relación con la capacidad de hinchamiento (CH), la variedad amarilla presentó un comportamiento superior (1.33 mL/g) respecto a la variedad verde (0.56 mL/g). No obstante, ambos valores fueron inferiores a los reportados por Suthar y otros autores[32], quienes registraron rangos de 8.33 a 21.43 mL/g en harinas elaboradas a partir de hojas de guayaba (*Psidium guajava* L.). En otro estudio[38] documentaron una CH de 1.8 mL/g en hojas de guanábana (*Annona muricata* L.), ligeramente por encima de los valores obtenidos en este estudio. Respecto a la capacidad emulsificante (CE), la variedad criolla verde presentó un valor ligeramente mayor (26.66 mL/g) en comparación con la variedad amarilla. Cabe señalar que la información sobre esta propiedad en hojas de especies frutales aún es limitada; sin embargo, se han reportado[32] actividades emulsificantes entre 0.55 y 3.83 % en hojas de distintos cultivares de mango (*Mangifera indica* L.), lo que evidencia la variabilidad de esta propiedad funcional en matrices vegetales. En conjunto, estos resultados sugieren que la

variedad criolla amarilla presenta un mejor desempeño en la retención de glucosa y capacidad de hinchamiento, lo que podría favorecer su aplicación como ingrediente con propiedades funcionales en el desarrollo de alimentos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados correspondientes a la composición química proximal y al contenido de fibra dietética en hojas deshidratadas de *Psidium guajava* L. En términos generales, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p<0.05$) en los parámetros de cenizas, proteínas, grasas, así como en la fibra dietética soluble e insoluble, lo que evidencia variaciones composicionales entre las variedades evaluadas. El contenido de humedad fue bastante similar entre ambas muestras, registrándose 9.67 % para la variedad criolla verde y 10.01 % para la variedad criolla amarilla. Estos valores coinciden con los resultados reportados en estudios realizados[39] en hojas secas de guanábana (*Annona muricata* L.) y hojas de higo (ficus carica) en polvo, encontrando un contenido de 9.67 % y 8.69 % respectivamente valores cercanos al encontrado en la hoja de guayaba.[40]

En cuanto al contenido de cenizas, la variedad criolla verde presentó un valor significativamente mayor (8.59 %) en comparación con la variedad criolla amarilla (6.7 %), lo que sugiere una mayor concentración de minerales en esta variedad. Estos resultados son parecidos con los reportados por Ezeabara y Okeke[41], quienes documentaron contenidos de cenizas entre 8 y 10 % en hojas de naranja (*Citrus sinensis*), valores muy similares a los observados en la variedad criolla verde. Por otro lado, Osum y colaboradores[42] informaron valores inferiores (6.55 %) en hojas de ciruela negra africana (*Vitex doniana*).

Tabla 3. Composición químico proximal y contenido de fibra dietética en las hojas deshidratadas de *Psidium guajava* L.

Parámetro	Variedad criolla verde	Variedad criolla amarilla
Humedad (%)	9.67 ± 0.15	10.01 ± 0.15
Cenizas (%)	8.59 ± 0.06*	6.7 ± 0.29
Proteína (%)	11.71 ± 0.28	14.23 ± 0.37*
Grasas (%)	2.06 ± 0.07*	1.16 ± 0.06
Carbohidratos (%)	68.15 ± 0.24	68.24 ± 0.24
Fibra dietética (%)		
Total	45.72 ± 0.40	44.65 ± 0.28
Soluble	7.09 ± 1.84	18.58 ± 2.72*
Insoluble	38.75 ± 1.56*	26.06 ± 2.71

Indica diferencia significativa ($p<0.05$*) entre variedades.

En el contenido de proteína, la variedad criolla amarilla presentó el valor más elevado (14.23 %), mostrando diferencias significativas en comparación con la variedad criolla verde (11.71 %). En conjunto, ambos resultados superan los reportados por Wojdyło y colegas[45] en hojas de manzano (*Malus domestica*), donde se han descrito contenido de proteína entre 5 y 8 %. De igual forma, la variedad criolla amarilla también se situó por encima del valor documentado por Vlaicu y otros autores[44] en hojas de ciruela (*Prunus spinosa*), con 10.94 %. Por otro lado, el contenido de grasas fue mayor en la variedad criolla verde (2.06 %) en comparación con la criolla amarilla (1.16 %). Alademeyin y colaboradores[45] han reportado valores inferiores, cercanos a 0.60 % en hojas de

mango (*Mangifera indica* L.), mientras que Usunobun y colegas[46] han descrito cifras más altas, alcanzando 21.22 %, lo que evidencia una amplia variabilidad entre especies.

En cuanto a los carbohidratos, ambas variedades mostraron resultados muy similares, con valores de 68.15 % para la criolla verde y 68.24 % para la criolla amarilla. Estos resultados son parecidos con los descritos por Kotula y otros autores[47], quienes reportaron rangos entre 68 y 77 % en hojas de frambuesa (*Rubus idaeus* L.). En contraste, Akšić y colaboradores[48] informaron contenidos menores, entre 5 y 10 %, en hojas de fresa (*Fragaria*), lo que evidencia diferencias importantes entre especies vegetales. Respecto a la fibra dietética total (FDT), ambas variedades presentaron valores elevados, ligeramente superiores en la criolla verde (45.72 %) frente a la criolla amarilla (44.65 %). No obstante, se observaron diferencias relevantes en las fracciones de fibra soluble (FS) e insoluble (FI). La variedad criolla amarilla destacó por un mayor contenido de fibra soluble (18.58 %), mientras que la criolla verde presentó una mayor proporción de fibra insoluble (38.75 %). En comparación, Biel y Jaroszewska[49] reportaron valores de FDT entre 40 y 55 % en hojas de mora (*Rubus fruticosus* L.), con fracciones de fibra soluble de 15 a 30 % e insoluble de 70 a 85 %. Asimismo, Cruz y colaboradores[50] documentaron rangos superiores para FDT (40–60 %), FDS (15–30 %) y FDI (15–30 %), lo que resalta las variaciones dependientes de la especie y del material vegetal evaluados.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que las hojas deshidratadas de *Psidium guajava* L. (variedades criollas verde y amarilla) contienen un alto potencial funcional y nutracéutico, debido a su composición fisicoquímica, perfil proximal y propiedades tecnológicas. En conjunto, su alto contenido de carbohidratos y fibra dietética, así como su capacidad de retención de agua, de lípidos y glucosa, confirman su posible aplicación, en el desarrollo de alimentos y/o suplementos funcionales orientados a la mejora de la salud y prevención de enfermedades no transmisibles, como sobrepeso, obesidad, hipertensión, diabetes mellitus tipo 2 y cáncer.

Ambas variedades mostraron atributos complementarios: la variedad criolla amarilla destacó por su mayor contenido de proteína, fibra soluble y capacidad de retención de glucosa, lo que sugiere un mayor potencial en la modulación de la respuesta glucémica; mientras que la variedad criolla verde presentó mayores contenidos de cenizas, grasa y fibra insoluble, lo cual podría favorecer su aporte mineral y su efecto en la regulación del tránsito intestinal. Esta complementariedad refuerza la relevancia del aprovechamiento integral de ambas variedades en aplicaciones tecnológicas.

En general, las hojas de guayaba constituyen una fuente significativa de compuestos bioactivos con potencial para ser incorporadas en formulaciones alimentarias y farmacéuticas con fines preventivos o coadyuvantes en el manejo de enfermedades no transmisibles. Finalmente, se recomienda profundizar en estudios de compuestos y capacidad antioxidante, bioaccesibilidad y evaluación *in vivo*.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kumar, M., Tomar, M., Amarowicz, R., Saurabh, V., Nair, M. S., Maheshwari, C., y Satankar, V. (2021). Guava (Psidium guajava L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. Foods, 10(4), 752. https://doi.org/10.3390/foods10040752
2. Díaz, E., Verardo, V., Gómez, A., Fernández, A., y Segura, A. (2017). Health effects of Psidium guajava L. leaves: an overview of the last decade. International journal of molecular sciences, 18(4), 897. https://doi.org/10.3390/ijms18040897
3. Viáfara, D., Reyes, J., Ramirez, N., y Luna-Fox, S. B. (2025). Composición química y compuestos polifenólicos totales de las hojas de tres variedades de Psidium guajava L. Código Científico Revista de Investigación, 6(E1), 1081-1098. https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/738

4. Fernández, E., y Pérez Pelea, L. (2015). MEJORAMIENTO GENÉTICO DE GUAYABO (Psidium guajava L.). Cultivos Tropicales, 36, 96–110. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193243640009
5. Suárez, J., Hernández, C., Domínguez, F., y Aceves, F. (2022). Caracterización de la guayaba cultivada en México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 13(7), 1233–1245.https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3039
6. Martínez, L., Martínez, K., y Noguera, N. (2021). Usos medicinales de las hojas de Psidium guajava L.“GUAYABA”. Revista Mangifera, 3.
7. Bermúdez V., Granados F, Molina A. (2019). Composición química y actividad antimicrobiana del aceite esencial de Psidium guajava y Cymbopogon citratus. Agron. Mesoam, 147-163. https://doi.org/10.15517/am.v30i1.33758
8. Fernández, P., y Fátima, L. (2024). Estudio de las propiedades antisépticas y fungicidas de las hojas de la guayaba: herramientas para la enseñanza de las ciencias naturales.
9. Párraga, R., Loor, D., y Solórzano, X., (2025). Actividad antioxidante y propiedades fisicoquímicas de una infusión a base de hoja de guayaba (Psidium guajava). AgroScience Research, 3(1), 53-59. https://doi.org/10.17268/agrosci.2025.006
10. Huynh, H., Nargotra, P., Wang, H.-M. D., Shieh, C.-J., Liu, Y.-C., y Kuo, C.-H. (2025). Bioactive Compounds from Guava Leaves (Psidium guajava L.): Characterization, Biological Activity, Synergistic Effects, and Technological Applications. Molecules, 30(6), 1278. https://doi.org/10.3390/molecules30061278
11. Estrella, M. E., Vega, K. M., Cavadiana, H. U., y Caicedo, L. T. (s/f). ALIMENTOS FUNCIONALES LA TENDENCIA DE CONSUMO DEL SIGLO XXI. RECIENA, 2(1), 10–19. https://doi.org/10.47187/kmh29p98
12. Fernández, E. L. (2007). Alimentos funcionales y nutracéuticos. Sociedad Española de Cardiología.
13. Hernández Ramírez, A., Gutiérrez Victorino, K. G., Ariza Ortega, J. A., Cruz Cansino, N. del S., y Ariza Ortega, T. E. (2026). Evaluación de los Beneficios de la Fibra Dietética en Personas con Enfermedades Cardiovasculares. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 10(1), 3396–3410. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1.22472
14. Vilcanqui-Pérez, F., y Vílchez-Perales, C. (2017). Fibra dietaria: nuevas definiciones, propiedades funcionales y beneficios para la salud. Revisión. Archivos latinoamericanos de nutricion, 67(2), 146–156.
15. Joseph, B., y Priya, M. (2011). Review on nutritional, medicinal and pharmacological properties of guava (Psidium guajava Linn.). International Journal of pharma and bio sciences, 2(1), 53-69.
16. Gutiérrez, R., Mitchell, S., y Solis, R. (2008). Psidium guajava: A review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. Journal of ethnopharmacology, 117(1), 1-27. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.025
17. Arima, H., y Danno, G. I. (2002). Isolation of antimicrobial compounds from guava (Psidium guajava L.) and their structural elucidation. Bioscience, biotechnology, and biochemistry, 66(8), 1727-1730.https://doi.org/10.1271/bbb.66.1727
18. Rodríguez, R., Lafourcade, A., y Pérez, L. (2013). Hojas de Psidium guajava L. Revista cubana de farmacia, 47(1), 127–135. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s0034-75152013000100014&script=sci_arttext
19. Butt, E., Altemimi, A. B., Younas, A., Butt, M. S., Jalal, M., Bhatty, M., Abdi, G., y Aadil, R. M. (2025). Guava (Psidium guajava): A brief overview of its therapeutic and health potential. Food Chemistry: X, 31(103027), 103027. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103027
20. Luo, Y., Peng, B., Wei, W., Tian, X., y Wu, Z. (2019). Antioxidant and anti-diabetic activities of polysaccharides from guava leaves. Molecules, 24(7), 1343.https://doi.org/10.3390/molecules24071343
21. Deguchi, Y., y Miyazaki, K. (2010). Anti-hyperglycemic and anti-hyperlipidemic effects of guava leaf extract. Nutrition & metabolism, 7(1), 9.https://doi.org/10.1186/1743-7075-7-9
22. Schiavoni, M. D. L. M., Laurella, S. L., y Caputo, M. (2021). *Análisis de acidez y basicidad en compuestos orgánicos*. Libros de Cátedra. https://doi.org/10.35537/10915/128877
23. Vergara Sotomayor, A., Páucar Cuba, K., Morales Comettant, C., Castro Mandujano, O., Pizarro Solís, P., y Díaz Rosado, J. (2018). Obtención de extractos de hojas de *Annona muricata* L.

(guanábana) inducidos por su efecto inhibidor de la corrosión. *Revista de la Sociedad Química del Perú, 84*(1), 119–132. https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.173

24. Parafati, L., Siracusa, L., Pesce, F., Restuccia, C., Fallico, B., y Palmeri, R. (2023). Mango (*Mangifera indica* L.) young leaf extract as brine additive to improve the functional properties of mozzarella cheese. *Food Chemistry, 425*, 136474. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136474
25. Salas Pedraza, N. (2022). *Optimización por superficie de respuesta del secado por lecho fluidizado de hojas de Citrus aurantifolia S. (limón sutil).*
26. Guevara, D. I., Arencibia, J. A., Santana, D. P., y Payrol, J. A. (2018). Elaboración de una bebida potencialmente funcional a partir de la hoja de aguacate (*Persea americana*). *Revista de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, 4*(1).
27. Ouhammou, M., Nabil, B., Ouaabou, R., Elgadi, S., Hidar, N., Jaouad, Y., ... y Mahrouz, M. (2022). The impact of drying method on bioactive compounds and microstructure of Jujube Zizyphus lotus leaves. *Herbal Medicines Journal*, *7*(4), 133-144.
28. Sepúlveda Rincón, C. T., Ciro Gómez, G. L., y Zapata Montoya, J. E. (2016). Extracción de compuestos fenólicos y actividad antioxidante de hojas de *Bixa orellana* L. (achiote). *Revista Cubana de Plantas Medicinales, 21*(2), 133–144. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1028-47962016000200002
29. Heredia, W. S. H., Mendoza, J. J. G., Alava, C. P., Mendoza, E. M. H., y Cedeño, J. J. S. (2021). Néctar de fruta con extracto acuoso de hoja de guanábana (*Annona muricata* L.). *Manglar, 18*(2), 181-186.
30. Sampath Kumar, N. S., Sarbon, N. M., Rana, S. S., Chintagunta, A. D., Prathibha, S., Ingilala, S. K., et al. (2021). Extracción de compuestos bioactivos de hojas de *Psidium guajava* y su utilización en la preparación de jaleas. *AMB Express, 11*(1), 36. https://doi.org/10.1186/s13568-021-01194-9
31. EasyRGB. (2023). Convert color data into different standard and color spaces. https://www.easyrgb.com/en/convert.php
32. Suthar, S. B., Deepthi, M. R., Munikumar, M., et al. (2025). Nutritional composition and in vitro bioaccessibility of minerals in composite flours from teff millet & guava leaves. *Discover Food, 5*(1). https://doi.org/10.1007/s44187-025-00371-0
33. Bejar, A. K., Kechaou, N., y Mihoubi, N. B. (2011). Effect of microwave treatment on physical and functional properties of orange peel and leaves. https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000109
34. Lawrence, G., Marchaux, I., Pejcz, E., et al. (2025). Mango leaves as functional food ingredient. *Molecules, 30*(16), 3381. https://doi.org/10.3390/molecules30163381
35. Kaur, J., Kaushik, D., Kumar, M., et al. (2025). Characterization of Mangifera indica L. leaf powder. *Food Science & Nutrition, 13*(6), e70083. https://doi.org/10.1002/fsn3.70083
36. Ngo, D.-H., Ngo, D.-N., Vo, T. T. N., y Vo, T. S. (2019). Mechanism of action of *Mangifera indica* leaves for anti-diabetic activity. *Scientia Pharmaceutica, 87*(2), 13. https://doi.org/10.3390/scipharm87020013
37. Wang, M., Mao, H., Ke, Z., Chen, J., Qi, L., y Wang, J. (2024). Chinese bayberry leaves proanthocyanidins inhibit glucose transport. *Frontiers in Pharmacology, 15*, 1284268. https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1284268
38. Andrade, F., Kawale, M., Ayyanar, M., Gurav, N., Kalaskar, M., y Gurav, S. (2022). Anatomy, micromorphology, physicochemical analysis, and isolation of fungal endophytes from the leaves of Annona muricata L. (Annonaceae). *Vegetos (Bareilly, India)*, *36*(2), 634–642. https://doi.org/10.1007/s42535-022-00441-z
39. Njoku, O. C., Igwe, C. U., Ujowundu, F. N., Chukwudoruo, C. S., Osuagwu, O. L., Edom, V. C., ... y Okereke, I. A. (2025). Proximate Composition of Dried Leaf and Stem Bark Ethanol Extracts of Annona muricata for Therapeutic Applications. *Asian Journal of Medical Principles and Clinical Practice*, *8*(2), 523-529. https://doi.org/10.9734/ajmpcp/2025/v8i2312
40. Osowe, C. O., Olowu, O. P. A., Adu, O. A., Oloruntola, O. D., y Chineke, C. A. (2021). Proximate and mineral composition, phytochemical analysis, and antioxidant activity of fig trees (Ficus spp.) leaf powder. *Asian journal of biochemistry, Genetics and Molecular Biology*, *9*(1), 19-29.
41. Ezeabara, C. A., y C, O. (2019). Nutrient content assessment of six citrus species parts and their feedstuff significance. *Agriculture and Food Sciences Research*, *6*(2), 166–171. https://doi.org/10.20448/journal.512.2019.62.166.171

42. Osum, F. I., Okonkwo, T. M., y Okafor, G. I. (2013). Effect of processing methods on the chemical composition of Vitex doniana leaf and leaf products. *Food Science & Nutrition*, *1*(3), 241–245. https://doi.org/10.1002/fsn3.31
43. Wojdyło, A., Nowicka, P., Turkiewicz, I. P., et al. (2021). Bioactive compounds in fruits and leaves. *Scientific Reports, 11*(1), 20253. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99293-x
44. Vlaicu, P. A., Varzaru, I., Turcu, R. P., Oancea, A. G., y Untea, A. E. (2026). Comparative evaluation of Wild Plum (Prunus spinosa L.) stone fruits and leaves: Insights into nutritional composition, antioxidant properties, and polyphenol profile. *Foods (Basel, Switzerland)*, *15*(1), 142. https://doi.org/10.3390/foods15010142
45. Alademeyin, J. O., Awoniyi, R. R., y Adeyemi, E. O. (2025). Proximate Composition and Mineral Content of Mango and Guava Leaves Grown in Ondo State, Nigeria. Asian Journal of Applied Chemistry Research, 16(4), 102-108.
46. Usunobun, U., Okolie, N. P., Anyanwu, O. G., Adegbegi, A. J., y Egharevba, M. E. (2015). Phytochemical screening and proximate composition of Annona muricata leaves. *European Journal of Botany Plant Science and Phytology*, *2*(1), 18-28.
47. Kotuła, M., Kapusta-Duch, J., Smoleń, S., y Doskočil, I. (2022). Phytochemical composition of the fruits and leaves of raspberries (Rubus idaeus L.)—Conventional vs. organic and those wild grown. *Applied Sciences*, *12*(22), 11783. https://doi.org/10.3390/app122211783
48. Akšić, M. F., Tosti, T., Sredojević, M., Milivojević, J., Meland, M., & Natić, M. (2019). Comparison of sugar profile between leaves and fruits of blueberry and strawberry cultivars grown in organic and integrated production system. *Plants*, *8*(7), 205.
49. Biel, W., y Jaroszewska, A. (2017). Nutritional value of berry leaves. *Scientia Agricola, 74*(5), 405–410. https://doi.org/10.1590/1678-992x-2016-0314
50. Cruz, A., Guamán, M., Castillo, M., Glorio, P., y Martínez, R. (2015). Fibra dietaria en subproductos de mango, maracuyá, guayaba y palmito. Revista Politécnica, 36(2), 9. Recuperado a partir de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_ politecnica2/article/view/633

EFECTOS DE LA NIXTAMALIZACIÓN EN PROTEÍNAS Y PERFIL DE AMINOÁCIDOS DE TORTILLAS DE MAÍCES CRIOLLOS DE ARANTEPACUA, MICHOACÁN, MÉXICO

Noé Calderón Téllez[1], Héctor Eduardo Martínez Flores[2], Eunice Tranquilino Rodríguez[2], José Juan Virgen Ortíz[3], Rafael Zamora Vega[2]

[1] Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [2] Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [3] SECIHTI–Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. (CIAD)–CIDAM.

hector.martinez.flores@umich.mx

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.), originario de México, cuenta con más de 60 razas, entre las que destacan son las denominadas como maíces criollos o nativos, distribuidos en diferentes regiones de nuestro país. En esta investigación se estudió el perfil proteico de maíces criollos azul, blanco y rojo colectados en la Meseta Purépecha de Michoacán, así como de sus harinas nixtamalizadas. La caracterización de los granos de maíz criollo azul, blanco y rojo evidenció diferencias composicionales relevantes entre variedades en cuanto al contenido de proteína y perfil de aminoácidos. El contenido de proteína de las variedades evaluadas osciló entre 12.17 y 12.49 % y el de las tortillas entre 7.86 y 8.05 %, representando una pérdida del 25.28% por efecto del tratamiento térmico-alcalino, así como de las etapas de reposo de los granos, y al calentamiento durante la elaboración de las tortillas. En las tres variedades de maíz la leucina, ácido glutámico y alanina fueron los aminoácidos de mayor concentración. El aminoácido limitante en las tres variedades de maíz fue la lisina, encontrándose por debajo de las recomendaciones de la FAO en 2024. El contenido de histidina fue alto comparado con las recomendaciones de la FAO, al presentarse valores de 57.28, 32.35 y 34.81 g histidina/g proteína en las harinas de las variedades blanco, azul y rojo, lo cual es relevante ya que este aminoácido es esencial durante etapas de crecimiento y participa en diversos procesos metabólicos. La nixtamalización y cocimiento de las tortillas indujo modificaciones en el perfil de aminoácidos en comparación con las harinas de los granos crudos. En particular, se observó una reducción en el contenido de lisina, lo cual puede ser atribuido a reacciones de Maillard y a la interacción de este aminoácido con compuestos formados durante la cocción alcalina como la lisinoalanina. El contenido de lisina paso de 41.05, 38.47 y 40.72 g lisina/g proteína en los maíces blanco, azul y rojo, a 29.52, 29.84 y 27.47 g lisina/g proteína en sus respectivas tortillas. Sin embargo, el contenido de aminoácidos esenciales, con excepción de la lisina, cumple con el perfil recomendado por la FAO. Los resultados del estudio evidencian que la nixtamalización modifica el perfil de aminoácidos del maíz, con efectos diferenciados según la variedad, conservando un balance de aminoácidos esenciales favorable.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, tanto por su volumen de producción como por su versatilidad de uso en sistemas alimentarios, industriales y pecuarios. A pesar de su importancia como alimento básico, el maíz presenta limitaciones nutricionales bien documentadas, particularmente en lo que respecta a la calidad de su fracción proteica. El contenido proteico del grano de maíz oscila generalmente entre 7 y 11%, dependiendo del genotipo y las condiciones de cultivo; sin embargo, más allá de la cantidad total de proteína, su principal restricción radica en un perfil aminoacídico desequilibrado, caracterizado por una baja proporción de aminoácidos esenciales, especialmente lisina y triptófano (1,2). Esta deficiencia compromete el valor biológico de la proteína del maíz y limita su capacidad para cubrir adecuadamente los requerimientos nutricionales humanos cuando se consume como fuente proteica principal. Desde el punto de vista bioquímico, esta limitación se explica por la composición de las proteínas de reserva del endospermo, dominadas por las zeínas, un grupo de prolaminas ricas en aminoácidos hidrofóbicos

pero deficientes en lisina y triptófano. Las zeínas representan hasta el 60% del total de proteínas del grano y presentan una baja digestibilidad, lo que reduce aún más el aprovechamiento proteico del maíz (3). En contraste, las fracciones proteicas no zeínicas -como las glutelinas y albúminas- contienen un perfil aminoacídico más balanceado, pero se encuentran en menor proporción. Esta distribución estructural explica por qué el maíz, aun con variaciones entre razas y variedades criollas, mantiene una limitación intrínseca en términos de calidad proteica.

Desde una perspectiva socioeconómica y alimentaria, el maíz es el principal componente de la dieta mexicana, especialmente en zonas rurales, donde el consumo diario de productos derivados como la tortilla constituye la base de la ingesta calórica (4). La tortilla elaborada a partir de maíz nixtamalizado es un alimento emblemático que aporta carbohidratos complejos, fibra dietaria, minerales y una fracción relevante de proteína vegetal, desempeñando un papel esencial en la seguridad alimentaria nacional (1).

Con relación a la nixtamalización, este es un proceso tradicional de cocción alcalina indispensable para la elaboración de tortillas y otros alimentos derivados del maíz, y constituye una de las tecnologías alimentarias más relevantes desarrolladas en Mesoamérica. Este tratamiento consiste en la cocción del grano en una solución alcalina, generalmente hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$], seguida de un periodo de reposo, lavado y molienda para la obtención de masa. Durante este proceso, el pH elevado y la acción térmica inducen modificaciones profundas en la estructura del grano, particularmente en el pericarpio, el endospermo y la matriz proteica–amilácea, lo que impacta de manera directa en las propiedades tecnológicas y nutricionales del producto final (2,5).

Referente a la fracción proteica, el tratamiento alcalino induce modificaciones en la solubilidad y digestibilidad de las proteínas del maíz. Si bien la composición aminoacídica no se altera de manera sustancial, la nixtamalización puede mejorar parcialmente la digestibilidad proteica al desnaturalizar las zeínas y facilitar el acceso de enzimas digestivas, especialmente cuando el proceso se combina con molienda adecuada y cocción posterior en forma de tortilla (2,4).

Desde el punto de vista nutrimental, la tortilla de maíz presenta limitaciones bien definidas en términos de calidad proteica, ya que hereda el perfil aminoacídico desequilibrado del grano, caracterizado por un bajo contenido de lisina y triptófano. Cuando se consume como fuente principal de proteína, esta deficiencia puede comprometer el aporte adecuado de aminoácidos esenciales, especialmente en contextos donde la dieta carece de diversidad suficiente (6).

Por otro lado, dentro de las razas de maíz, se encuentran los maíces conocidos como nativos o criollos, donde algunos de ellos son de naturaleza pigmentante. Los maíces criollos presentan un interés particular debido a las diferencias estructurales y composicionales entre variedades, las cuales se reflejan tanto en atributos físicos del grano como en el contenido de macronutrientes y compuestos bioactivos.

Por lo tanto, esta variabilidad hace necesaria una caracterización detallada que permita establecer comparaciones entre variedades y sustentar su selección para aplicaciones alimentarias con enfoque funcional. Es por ello que el objetivo de la presente investigación fue estudiar el efecto del procesamiento de nixtamalización de tres maíces criollos de la meseta purépecha del estado de Michoacán, siendo de coloración azul roja y blanca.

PARTE EXPERIMENTAL

Las tres variedades de maíz criollo (*Zea mays L.)* de la localidad de Arantepacua, ubicada en la región Purépecha del estado de Michoacán, México. Las variedades seleccionadas correspondieron a granos de color blanco, azul y rojo, representativos de los materiales tradicionalmente cultivados y utilizados para autoconsumo en la región. La colecta se realizó directamente en parcelas de productores locales durante el ciclo agrícola correspondiente. Las muestras fueron trasladadas al

laboratorio en condiciones secas y ventiladas, donde se procedió a su limpieza manual para eliminar impurezas, granos dañados y material extraño.

Preparación de harinas nixtamalizadas y elaboración de tortillas
La obtención de harinas nixtamalizadas se realizó siguiendo un procedimiento tradicional con ligeras adecuaciones (7). Para cada variedad de maíz, se mezcló 1 kg de grano con 2 L de agua potable y 10 g de hidróxido de calcio. La mezcla se sometió a cocción en estufa de gas hasta alcanzar una temperatura aproximada de 92 °C, manteniéndose por un periodo de 40–45 min. Una vez finalizada la cocción, los granos se dejaron reposar en el mismo líquido de cocción (nejayote) durante 16 h a temperatura ambiente. Posteriormente, el nejayote fue decantado y los granos nixtamalizados se lavaron con 2 L de agua potable por kilogramo de maíz para eliminar el exceso de hidróxido de calcio y parte del pericarpio desprendido. El nixtamal obtenido se molió en un molino de piedras para la obtención de masa, la cual se deshidrató en un equipo de secado tipo flash y se pulverizó hasta obtener harina con tamaño de partícula homogéneo.

La elaboración de las tortillas se realizó a partir de las harinas nixtamalizada, las cuales se rehidrataron hasta alcanzar un contenido de humedad aproximado del 60%. A partir de la masa obtenida, se elaboraron testales de 30 ± 1 g, los cuales se comprimieron mediante una tortilladora manual para obtener discos de 13.5 cm de diámetro y 1.2 mm de espesor. Los discos se cocieron en un comal de hierro precalentado a una temperatura promedio de 180 °C, aplicando un tiempo de cocción de 17 s en la primera cara, 55 s en la segunda y 17 s finales tras el segundo volteo.

Contenido de proteína y del perfil de aminoácidos
El contenido de proteínas del maíz crudo, de las harinas nixtamalizadas y de las tortillas se realizó mediante el método de la AACC (8). El contenido de proteína se calculó a partir del nitrógeno total determinado por el método Kjeldahl. El perfil de aminoácidos de las harinas nixtamalizadas se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), previo proceso de hidrólisis ácida de las proteínas, siguiendo procedimientos estandarizados para la cuantificación de aminoácidos en matrices alimentarias. La identificación y cuantificación de los aminoácidos se realizó mediante comparación de los tiempos de retención y áreas de los picos cromatográficos con estándares comerciales certificados. Los resultados se expresaron como miligramos de aminoácido por 100 gramos de muestra.

Análisis estadístico
Los resultados se expresan como media ± desviación estándar (n = 3). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $p \leq 0.05$ para detectaron diferencias significativas entre tratamientos. El análisis estadístico se realizó utilizando el software RStudio.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se observa que el contenido de proteína de las variedades evaluadas osciló entre 12.17 y 12.49%, valores que se encuentran dentro del rango reportado para maíces criollos mexicanos y que superan, en general, el contenido proteico típico de variedades híbridas o comerciales, el cual suele situarse entre 7 y 10 % (9). Estos resultados son consistentes con estudios realizados en distintas regiones del país, donde se han documentado contenidos proteicos similares en maíces blancos y pigmentados recolectados en Guerrero y Puebla (10,11). La retención del pericarpio y de la capa de aleurona en los maíces criollos ha sido señalada como un factor determinante en la conservación de fracciones proteicas relevantes, lo que puede explicar los valores observados en este estudio (12). En este contexto, los resultados confirman que los maíces criollos pigmentados pueden igualar o incluso superar el contenido proteico de variedades no pigmentadas, dependiendo de la raza y de las condiciones de cultivo, reforzando su importancia como fuente de aminoácidos para la dieta en comunidades rurales.

Tabla 1. Caracterización bromatológica de los granos de maíz.

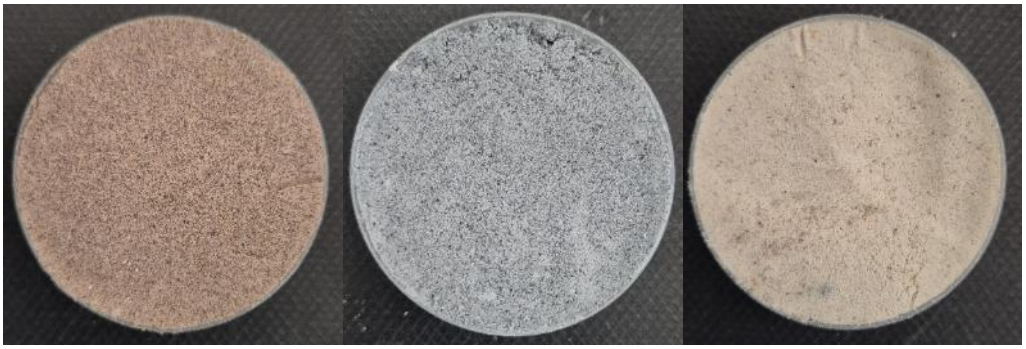
Parámetro	Maíz azul	Maíz blanco	Maíz rojo
Proteína en			
Granos	12.17 ± 0.04 [b]	12.49 ± 0.43 [a]	12.37 ± 0.06 [a]
Harinas nixtamalizadas	10.05 ± 0.30 [a]	9.73 ± 0.03 [b]	8.41 ± 0.78 [c]
Tortillas	10.03 ± 0.10 [a]	9.69 ± 0.10 [b]	7.96 ± 1.20 [c]

Valor medio calculado a partir de tres réplicas ± desviación estándar. Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Se evaluaron las harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de las tres variedades de maíz criollo. La nixtamalización y la molienda representan etapas críticas que modifican la estructura del grano y pueden inducir cambios en la composición nutrimental y las propiedades funcionales de la matriz. Por ello, la caracterización de las harinas permite evaluar el impacto del procesamiento tradicional sobre los atributos del maíz y establecer una base comparativa para el análisis posterior de productos elaborados a partir de estas harinas.

La composición bromatológica de las harinas nixtamalizadas obtenidas a partir de maíces criollos azul, blanco y rojo se encontró dentro de los parámetros establecidos por la norma NMX-F-046-SCFI-2018 (13), la cual establece como referencia un contenido mínimo de proteína de 7%. En este estudio, el contenido de proteína osciló entre 7.86 y 8.05%, confirmando valores superiores al mínimo normativo.

La disminución del contenido proteico observada en las harinas con respecto a los granos originales concuerda con lo descrito para el proceso de nixtamalización tradicional, donde se ha reportado la pérdida de fracciones proteicas solubles, principalmente hacia el nejayote durante las etapas de cocción y lavado alcalino. A pesar de las pérdidas, los valores obtenidos evidencian que las harinas hechas a partir de maíces criollos mantienen un contenido proteico competitivo frente a productos comerciales, lo que refuerza su potencial para aplicaciones alimentarias con enfoque nutrimental y funcional. En la Figura 1 se muestran las harinas nixtamalizadas con los tres tipos de maíz.
En las tortillas el contenido de proteína osciló entre 7.96 ± 1.2% en la tortilla de maíz rojo y 10.03 ± 0.15% en la tortilla de maíz azul, valores que se encuentran dentro de los rangos reportados para tortillas tradicionales elaboradas por nixtamalización, típicamente entre 7 y 10% en base seca (9,14). La mayor concentración proteica observada en tortillas de maíz azul puede atribuirse tanto al perfil intrínseco del mimo maíz como a la retención diferencial de proteínas de la aleurona durante la nixtamalización, fenómeno previamente documentado en variedades pigmentadas (12).



Harina maíz Rojo Harina maíz Azul Harina maíz Blanco

Figura 1. Harinas nixtamalizadas de maíz.

Perfil de aminoácidos de los granos de maíz y harinas nixtamalizadas

El análisis del perfil de aminoácidos de los granos de maíz criollo confirmó el patrón característico descrito para esta especie, en el que lisina y triptófano se identifican como los principales aminoácidos limitantes de la proteína del maíz (15,16). En las tres variedades evaluadas, leucina, ácido glutámico y alanina fueron los aminoácidos de mayor concentración, mientras que lisina y triptófano presentaron los valores más bajos (Tabla 2). No obstante, se observaron diferencias entre variedades, destacando el maíz azul por presentar concentraciones ligeramente superiores de lisina y triptófano en comparación con el maíz blanco y rojo. Asimismo, el contenido de histidina fue notablemente mayor en el maíz azul, lo que resulta relevante desde el punto de vista nutricional, ya que este aminoácido es esencial durante etapas de crecimiento y participa en diversos procesos metabólicos.

La variabilidad observada en el perfil de aminoácidos entre las variedades analizadas concuerda con lo reportado para maíces criollos, donde factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico influyen de manera significativa en la composición proteica del grano (17). En términos globales, la proporción de aminoácidos esenciales respecto a los aminoácidos totales fue cercana al 35%, mientras que la relación aminoácidos esenciales/aminoácidos no esenciales se aproximó al 53%, valores consistentes con los reportados para maíces criollos destinados al consumo humano.

La nixtamalización indujo modificaciones en el perfil de aminoácidos de las harinas en comparación con los granos crudos (Tabla 2). En particular, se observó una reducción en el contenido de lisina en las harinas nixtamalizadas, lo cual ha sido atribuido a reacciones de Maillard y a la interacción de este aminoácido con compuestos formados durante la cocción alcalina, disminuyendo su contenido total y potencialmente su disponibilidad (18), así como a la posible formación de lisinoalanina donde interviene la lisina indisponiéndose. A pesar de esta disminución, la harina nixtamalizada de maíz azul mantuvo el mayor contenido de lisina entre las variedades evaluadas, seguida de la blanca y la roja, lo que sugiere una mayor retención relativa de este aminoácido esencial en la variedad azul tras el procesamiento.

En el caso del triptófano, los cambios inducidos por la nixtamalización fueron menos consistentes entre variedades. Aunque algunos estudios han reportado ligeras disminuciones en su contenido total, también se ha señalado que el tratamiento alcalino puede mejorar su biodisponibilidad. En este estudio, la harina nixtamalizada de maíz rojo presentó un contenido ligeramente superior de triptófano en comparación con las harinas azul y blanca, lo que podría estar relacionado con diferencias en la estabilidad de este aminoácido o con su liberación a partir de la matriz proteica durante el procesamiento. Un aspecto relevante fue el mantenimiento de un contenido elevado de histidina en la harina nixtamalizada de maíz azul, en concordancia con lo observado en el grano crudo, lo que refuerza el potencial nutricional de esta variedad. Adicionalmente, se observó un incremento en el contenido de metionina en las harinas nixtamalizadas respecto a los granos originales, particularmente en la harina de maíz azul. Este comportamiento, poco documentado en la literatura, sugiere posibles cambios en la accesibilidad o concentración relativa de aminoácidos sulfurados tras la nixtamalización y resalta la necesidad de estudios adicionales que permitan esclarecer la interacción entre el tratamiento alcalino y la matriz proteica de los maíces criollos.

Estos resultados evidencian que la nixtamalización modifica el perfil de aminoácidos del maíz, con efectos diferenciados según la variedad, y que la harina nixtamalizada de maíz azul conserva un balance de aminoácidos esenciales relativamente más favorable en comparación con las variedades blanca y roja, lo cual resulta relevante para su aprovechamiento en el desarrollo posterior de productos fortificados

Tabla 2. Perfil de aminoácidos de maíces criollos azul, blanco y rojo (g aminoácido/g de proteína).

Aminoácido	Grano			Harina nixtamalizada			Tortilla			Fao y IAEA (2024) (19)
	Azul	Blanco	Rojo	Azul	Blanco	Rojo	Azul	Blanco	Rojo	
Lisina	20.79	19.14	20.05	27.1	25.1	25.8	23.33	23.22	27.01	45
Triptófano	4.03	3.28	2,91	4.6	4.6	5.27	5.28	4.75	7.16	6
Treonina	18.82	18.98	19.00	3.22	3.02	2.95	28.41	26.83	34.42	23
Metionina + cistina	17.34	14.33	15.44	25.71	20.05	26.47	16.05	12.49	15.83	22
Isoleucina	15.69	16.09	16.09	27.2	27.5	27.2	25.92	26.32	32.04	30
Leucina	54.72	58.69	55.78	10.75	11.13	10.79	97.31	94.43	118.09	59
Fenilalanina + Tirosina	34.84	37.15	36.94	43.6	44.58	46.11	39.38	37.87	45.73	38
Valina	23.50	24.10	23.93	39.0	39.1	37.7	36.89	36.74	48.49	30
Histidina	29.01	16.09	17.14	20.05	17.21	19.47	18.94	19.30	20.73	15

El análisis del perfil de aminoácidos expresado en mg de AA/100 g de muestra en las tortillas control elaboradas a partir de maíces criollos azul, blanco y rojo confirma el patrón característico de las proteínas del maíz. Los aminoácidos no esenciales como ácido glutámico (161.40–206.46 mg/100 g), leucina (94.43–118.99 mg/100 g), alanina (57.59–72.78 mg/100 g) y prolina (47.66–84.81 mg/100 g) predominan cuantitativamente, mientras que aminoácidos esenciales limitantes como lisina (23.22–27.22 mg/100 g) y triptófano (4.75–7.22 mg/100 g) se encuentran en concentraciones considerablemente menores. Este comportamiento es consistente con lo descrito para proteínas de maíz nixtamalizado, donde lisina y triptófano constituyen los principales aminoácidos limitantes de la calidad proteica.

CONCLUSIONES

Los maíces criollos presentaron contenidos relevantes de proteínas comparables o superiores a los reportados para variedades comerciales. Aunque el perfil de aminoácidos confirmó las deficiencias características del maíz en lisina y triptófano, las variedades pigmentadas, particularmente el maíz azul, mostraron concentraciones ligeramente superiores de algunos aminoácidos esenciales, lo que sugiere un potencial nutricional diferenciado que podría ser aprovechado mediante estrategias de formulación y complementación. El proceso de nixtamalización indujo modificaciones esperadas en la composición de las harinas, incluyendo una reducción moderada del contenido proteico atribuible a pérdidas durante la cocción alcalina, el lavado del nixtamal y la cocción de las tortillas.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Bressani, 2008. Maize and maize products in human nutrition. FAO Food and Nutrition Series No. 25. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2008.
2. S. O. Serna-Saldívar, “Cereal grains: Properties, processing, and nutritional attributes”, CRC Press. 2020.
3. M. C. D. Paes, “Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho”, Embrapa Milho e Sorgo. 2006.
4. J. A. Gwirtz, M. N. García-Casal, “Processing maize flour and corn meal food products”, Annals of the New York Academy of Sciences, 1312, 2014, 66–75.
5. C. de la Parra, S. O. Serna Saldivar, R. H. Liu, “Effect of processing on the phytochemical profiles and antioxidant activity of corn for production of masa, tortillas, and tortilla chips”, J. Agric. Food Chem. Vol. 55, 10, 2007, pp 4177-4183.
6. J. P. Hernández-Uribe, M. Ramos-Gómez, Y. Salinas-Moreno, L. A. Bello-Pérez, “Phenolic compounds and antioxidant activity of pigmented maize tortillas”, Food Chemistry, 305, 2020, 125491.

7. F. A. Zavala, F. A., “Efecto del proceso de nixtamalización por infrarrojo sobre el contenido de aflatoxinas en las tortillas de maíz. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México, 2015, 1-77.
8. AACC. (2000). Approved methods of analysis (10th ed.). American Association of Cereal Chemists.
9. S. O. Serna-Saldívar, “Cereal grains: properties, processing, and nutritional attributes” (2nd ed.). CRC Press. 2015.
10. Y. I. Maldonado-Astudillo, A. A. Gutiérrez González, Y. L. Flores Rogel, G. Arámbula-Villa, V. Flores-Casamayor, J, Jiménez-Hernández, M. Ramírez, P. Álvarez-Fitz, R. Salazar, R. “Propiedades morfométricas, fisicoquímicas y actividad antiproliferativa de maíces pigmentados de Guerrero”, Nova Scientia, Vol. 13, 27, 2021, 00010.
11. E. Domínguez Escorcia, R. Bernal Muñoz, R. Hernández Díaz, O. A. López Mejía, J. L. Macías García, E. L. Rodríguez Castañeda, F. L. Peña Escalona, “Componentes morfológicos, contenido nutricional y de antocianinas en forraje verde hidropónico de maíces criollos de color”, Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical, Vol. 4, , 2024, pp 1-16.
12. S. Mora-Rochin, J. A. Gutiérrez-Uribe, S. O. Serna-Saldivar, P. Sánchez-Peña, C. Reyes-Moreno, J. Milán-Carrillo, “Phenolic content and antioxidant activity of tortillas produced from pigmented maize processed by conventional nixtamalization or extrusion cooking”, J. Cereal Sci., Vol. 52, 3, 2010, pp 502-508.
13. NMX-F-046-SCFI. 2018 Norma Oficial Mexicana. Harina de maíz nixtamalizado.
14. Escalante-Aburto, R. M. Mariscal-Moreno, D. Santiago-Ramos, N. Ponce-García, “An update of different nixtamalization technologies, and its effects on chemical composition and nutritional value of corn tortillas” Food Rev Int, Vol 36, 5, 2020, pp 456-498.
15. NRC. Nutrient requirements of laboratory animals (4th ed.). National Academy Press. 1988.
16. CIMMYT. Maize—Global alliance for improving food security and livelihoods. International Maize and Wheat Improvement Center. 2010.
17. J. L. Chávez-Servia, A. M. Vera-Guzmán, J. C. Carrillo-Rodríguez, D. Hernández-López, “Comparative Study of Proximate Composition, Phenolic Compounds, and Antioxidant Capacity in Four Maize (Zea mays L.) Genotypes Cultivated under Agroecological and Conventional Systems” Int. Agrophysics, 35(3), 2021, pp 329–338.
18. O. Paredes-López, L. A. Bello-Pérez, M. G. López, M. G. “Corn: Chemistry and Technology” (2nd ed.). AACC International Press. 2009.
19. FAO, IAEA (2024) Development of a protein database and the way forward for reviewing protein requirements: Report of a joint FAO/IAEA technical meeting in Vienna, 10–13 October 2022 (pp. 1–68). FAO.

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ESTIMULACIÓN CON CAMPOS MAGNÉTICOS PERMANENTES EN SEMILLAS DE *Capsicum Annuum* SEMBRADAS EN TIERRA

Liliana Paola Martinez Martinez[1], Josue Gabriel Reyes Delgado[1], Daniel Sanchez Guzman[1], Lisset Herrera Isidron[1], Erika Cervantes Juarez[2]

[1]Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Guanajuato (UPIIG). Instituto Politécnico Nacional. Silao de la Victoria, [2]Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería, campus "Alejo Peralta" (UPIIAP). Instituto Politécnico Nacional. Heroica Puebla de Zaragoza.
lherrerai@ipn.mx

RESUMEN

El uso de campos magnéticos como agente de bioestimulación ha despertado interés en el ámbito agrícola debido a su potencial para mejorar la germinación y el desarrollo inicial de cultivos. En este trabajo se evaluó el efecto de un campo magnético estático de 90 mT (±10 mT) aplicado durante 24, 48 y 72 horas sobre semillas de *Capsicum annuum* de tres variedades: chile de árbol, jalapeño y serrano. Posteriormente, las semillas fueron sembradas en suelo y monitoreadas durante 28 días para analizar su tasa de germinación, número de hojas y grosor del tallo. Los resultados mostraron una mejora significativa en la germinación de las semillas tratadas, particularmente en los tratamientos de mayor tiempo de exposición, donde se alcanzó hasta el 100% de germinación en chile serrano y chile de árbol. Asimismo, se observó un incremento notable en el vigor de las plántulas, reflejado en un mayor número de hojas y un aumento en el grosor del tallo, destacando un incremento de hasta 145% en chile jalapeño y 200% en el número de hojas en chile serrano. Estos hallazgos confirman que la estimulación con campos magnéticos puede favorecer procesos fisiológicos clave durante las primeras etapas del desarrollo vegetal. Además, evidencian su potencial como una herramienta no invasiva y sostenible para mejorar el establecimiento inicial de cultivos hortícolas, sentando bases para futuras investigaciones enfocadas en la optimización de parámetros de aplicación.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos y la necesidad de mejorar la eficiencia en la producción agrícola han impulsado la búsqueda de estrategias innovadoras que optimicen el establecimiento y desarrollo de los cultivos desde sus etapas iniciales. La germinación de semillas representa una fase crítica en el ciclo de vida de las plantas, ya que de ella depende en gran medida el rendimiento final del cultivo. En este contexto, la aplicación de estímulos físicos, como los campos magnéticos, ha emergido como una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia fisiológica de las semillas sin recurrir a insumos químicos adicionales.

La bioestimulación mediante campos magnéticos se fundamenta en la capacidad de estos de interactuar con sistemas biológicos, induciendo cambios a nivel celular y molecular. Se ha propuesto que los campos magnéticos pueden modificar la permeabilidad de las membranas celulares, favorecer el transporte de iones y estimular la actividad enzimática, lo que impacta directamente en procesos como la imbibición, la respiración celular y la síntesis de proteínas (Vashisth y Nagarajan, 2010). Estos efectos se traducen en una germinación más rápida y uniforme, así como en un desarrollo inicial más vigoroso.

Diversos estudios han documentado los efectos positivos de la estimulación magnética en diferentes especies vegetales. Flórez et al. (2007) observaron que la exposición de semillas de maíz a campos magnéticos estacionarios incrementa significativamente la germinación y el crecimiento temprano. De manera similar, Martínez et al. (2009) reportaron mejoras en la germinación de semillas de jitomate sometidas a campos magnéticos, sugiriendo una relación directa entre la intensidad del campo y la respuesta fisiológica de la planta. En el caso específico de Capsicum annuum, Ahamed et al. (2013) demostraron que la exposición a campos magnéticos puede incrementar tanto la

germinación como el rendimiento, lo que refuerza el interés en esta técnica como herramienta de mejora agrícola.

A nivel fisiológico, se ha planteado que la estimulación magnética puede influir en la regulación hormonal de las plantas, particularmente en fitohormonas como auxinas y giberelinas, las cuales desempeñan un papel fundamental en la elongación celular, la diferenciación de tejidos y el desarrollo de órganos vegetales. Asimismo, algunos autores sugieren que los campos magnéticos pueden inducir cambios en la estructura del agua y en su disponibilidad para la semilla, facilitando procesos metabólicos esenciales durante la germinación (Ospina-Salazar et al., 2022).

A pesar de los avances en este campo, aún existe una falta de estandarización en los parámetros de aplicación, tales como la intensidad del campo magnético, el tiempo de exposición y las condiciones experimentales, lo que limita su implementación a gran escala. Por ello, resulta necesario generar evidencia experimental que permita establecer relaciones claras entre estos factores y la respuesta de diferentes especies vegetales.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la estimulación con campos magnéticos permanentes sobre semillas de *Capsicum annuum* de tres variedades (chile de árbol, jalapeño y serrano), analizando su impacto en la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas. Con ello, se busca contribuir al entendimiento de los mecanismos asociados a la bioestimulación magnética y aportar información relevante para el desarrollo de tecnologías agrícolas más eficientes y sustentables.

TEORÍA

La magnetobiología es una rama interdisciplinaria que estudia las interacciones entre los campos magnéticos y los sistemas biológicos, así como las respuestas bioquímicas, fisiológicas y moleculares derivadas de dicha exposición. En organismos vegetales, diversos estudios han sugerido que los campos magnéticos estáticos pueden influir en procesos fundamentales como la permeabilidad de membranas, el transporte de iones, la actividad enzimática y la generación de especies reactivas de oxígeno, favoreciendo la activación metabólica durante la germinación y las primeras etapas del crecimiento. Asimismo, se ha propuesto que estos estímulos físicos pueden modificar la dinámica del agua y participar en mecanismos de señalización celular relacionados con la expresión génica y la regulación hormonal, particularmente mediante fitohormonas involucradas en la división y elongación celular (Vashisth y Nagarajan, 2010; Flórez et al., 2007). Sin embargo, los mecanismos biofísicos responsables de estos efectos aún no han sido completamente esclarecidos, por lo que continúan siendo objeto de investigación.

A pesar de los resultados favorables reportados en distintas especies agrícolas, la magnetobiología vegetal continúa siendo un campo emergente con una disponibilidad limitada de información experimental y una considerable heterogeneidad metodológica. La ausencia de protocolos estandarizados respecto a la intensidad del campo magnético, tiempo de exposición y condiciones de cultivo dificulta la comparación entre estudios y la construcción de modelos teóricos robustos. En consecuencia, gran parte del conocimiento disponible se basa en investigaciones aisladas y en hipótesis mecanísticas que todavía requieren validación experimental. Esta escasez de información representa uno de los principales desafíos para la consolidación de la magnetobiología vegetal como una herramienta biotecnológica aplicable a escala agrícola, lo que resalta la necesidad de desarrollar estudios sistemáticos que permitan comprender con mayor profundidad la relación entre los campos magnéticos y la fisiología de las plantas (Ospina-Salazar et al., 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

El diseño experimental se llevó a cabo en tres etapas principales: pretratamiento magnético, siembra en suelo y evaluación del crecimiento.

En la primera etapa, las semillas de *Capsicum annuum* (variedades chile de árbol, jalapeño y serrano) fueron colocadas en cajas plásticas de aproximadamente 20 mm × 5 mm. Posteriormente, se dividieron en grupos experimentales y control. Para los tratamientos, se colocó un imán permanente debajo de cada caja, generando un campo magnético estático de aproximadamente 90 mT (±10 mT). Las semillas fueron expuestas durante 24, 48 y 72 horas, mientras que el grupo control se mantuvo en condiciones idénticas sin exposición al campo magnético.

En la segunda etapa, las semillas fueron sembradas en suelo, asegurando condiciones homogéneas de humedad, temperatura y exposición a la luz. Se procuró mantener una distribución uniforme para evitar variaciones en el crecimiento atribuibles a factores externos.

Finalmente, en la tercera etapa se realizó el monitoreo del desarrollo de las plántulas durante un periodo de 28 días. Se registraron variables como el porcentaje de germinación, el número de hojas y el grosor del tallo, con el fin de evaluar el efecto del tratamiento magnético en comparación con el grupo control.

La Figura 1 muestra de manera esquemática el procedimiento seguido durante el desarrollo del experimento, a manera de hacer más visual su comprensión.

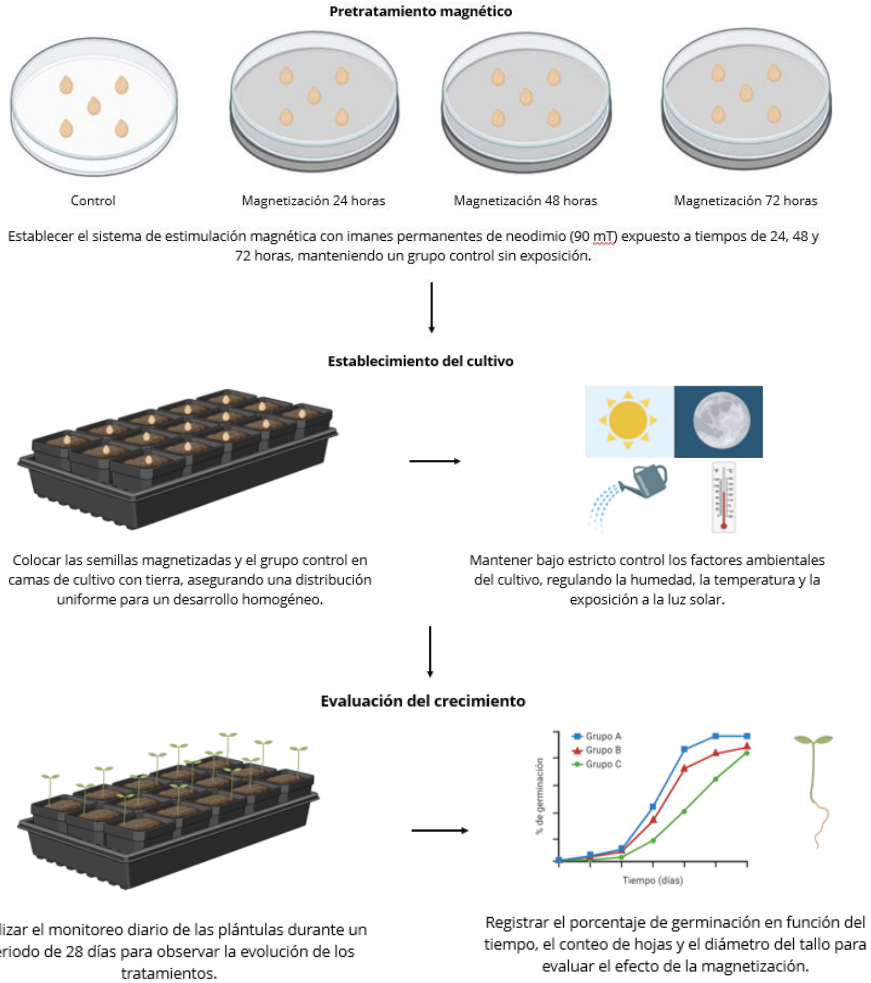


Figura 1. Diagrama del proceso experimental.

En la Figura 2 se pueden visualizar las etapas con imágenes reales del experimento, en las cuáles es posible ver la magnetización, siembra y germinación.

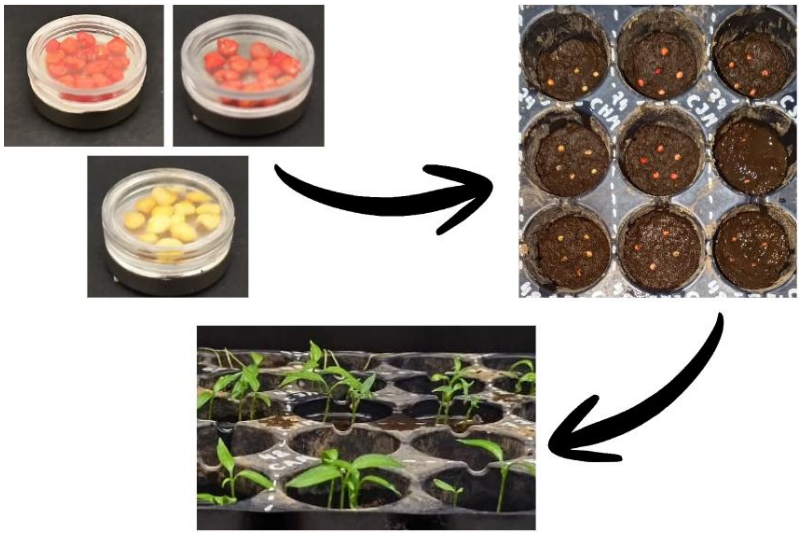


Figura 2. Etapas de la experimentación.

RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar el efecto de la estimulación magnética en semillas de *Capsicum annuum*, se analizaron tanto la dinámica de germinación como parámetros de crecimiento inicial en tres variedades. En general, los resultados muestran una tendencia favorable en las semillas tratadas con campo magnético en comparación con los grupos control, observándose diferencias tanto en la velocidad de germinación como en el desarrollo morfológico de las plántulas.

En la Figura 3a se presenta la curva de germinación del chile de árbol, donde se observa el porcentaje acumulado de germinación en función del tiempo. El tratamiento con campo magnético muestra una tendencia claramente superior respecto al control, evidenciando una germinación más rápida y uniforme. Particularmente, las semillas expuestas durante 72 horas alcanzan una germinación completa en menor tiempo, mientras que el grupo control presenta un comportamiento más lento y con menor porcentaje final.

En la Figura 3b se muestran los parámetros de crecimiento correspondientes al chile de árbol, específicamente el número de hojas y el grosor del tallo. Se observa que los tratamientos magnéticos favorecen ambos parámetros, destacando un incremento progresivo conforme aumenta el tiempo de exposición. El tratamiento de 72 horas presenta los valores más altos, lo que sugiere un efecto dependiente del tiempo de estimulación.

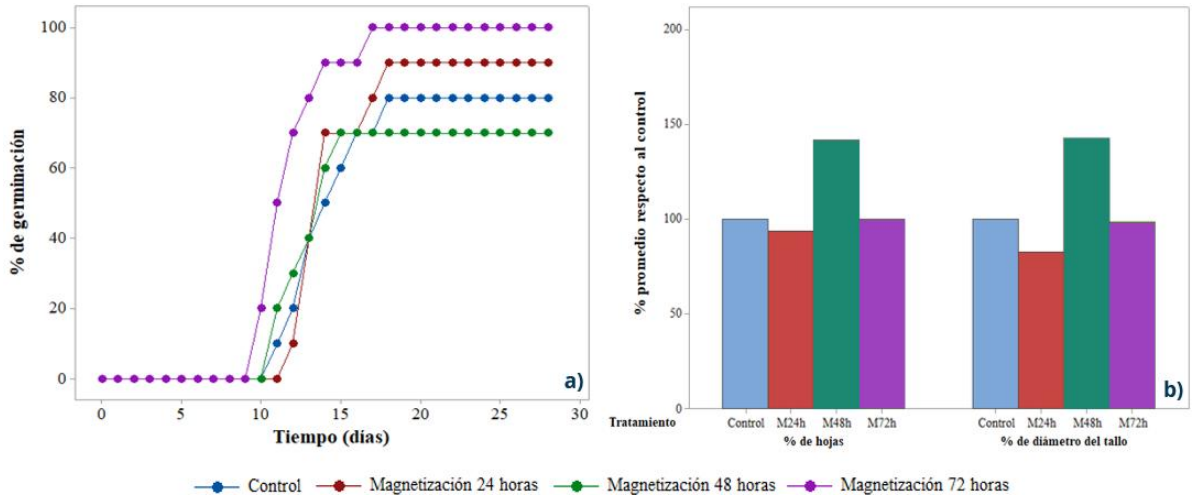


Figura 3. Gráficas de porcentaje de tasa de germinación contra días transcurridos (a), número de hojas y ancho de tallo (b) con respecto al control de chile de árbol.

Para el caso del chile jalapeño, en la Figura 4a se observa una tendencia similar en la curva de germinación. Las semillas sometidas a campo magnético presentan una germinación más acelerada en comparación con el control, alcanzando porcentajes más altos en menor tiempo. Nuevamente, el tratamiento de mayor duración muestra el comportamiento más favorable.

En la Figura 4b, correspondiente al crecimiento del chile jalapeño, se evidencia un aumento notable en el grosor del tallo en los tratamientos magnéticos, siendo particularmente significativo en el tratamiento de 72 horas, donde se alcanza el mayor incremento respecto al control. Asimismo, el número de hojas presenta un aumento consistente, lo cual refleja un desarrollo vegetativo más vigoroso.

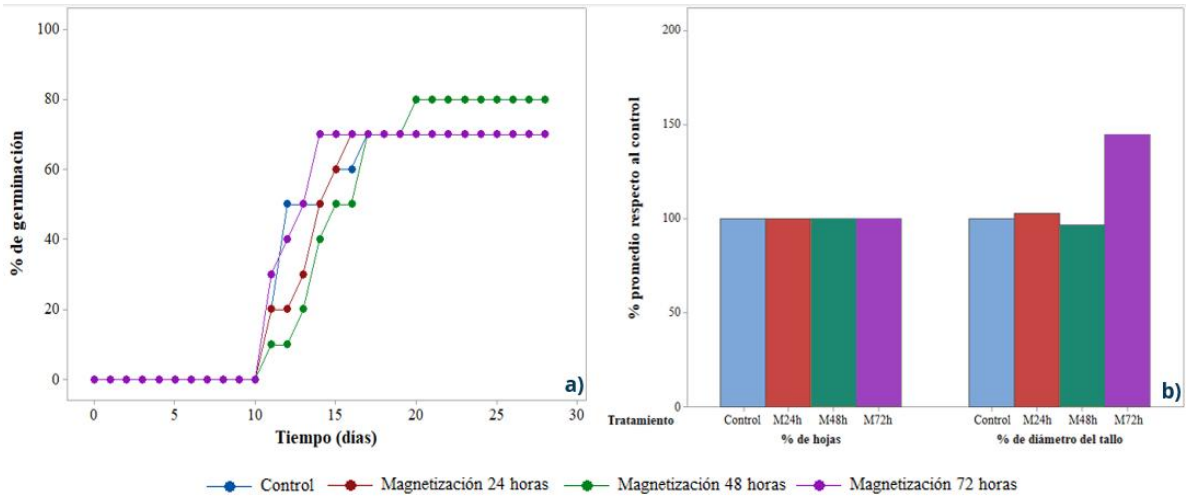


Figura 4. Gráficas de porcentaje de tasa de germinación contra días transcurridos (a), número de hojas y ancho de tallo (b) con respecto al control de chile jalapeño.

En la Figura 5a, que corresponde al chile serrano, se observa una respuesta aún más marcada en la germinación. Las semillas tratadas alcanzan el 100% de germinación, especialmente en el tratamiento de 72 horas, mientras que el control presenta un porcentaje inferior y un desarrollo más tardío.

Finalmente, en la Figura 5b se muestran los parámetros de crecimiento del chile serrano, donde se destaca un incremento considerable en el número de hojas, alcanzando valores hasta dos veces mayores que el control. El grosor del tallo también presenta un aumento, aunque menos pronunciado en comparación con otras variedades. En conjunto, estos resultados indican que la estimulación magnética tiene un efecto positivo tanto en la germinación como en el desarrollo inicial de las plántulas, con variaciones dependiendo de la especie y el tiempo de exposición.

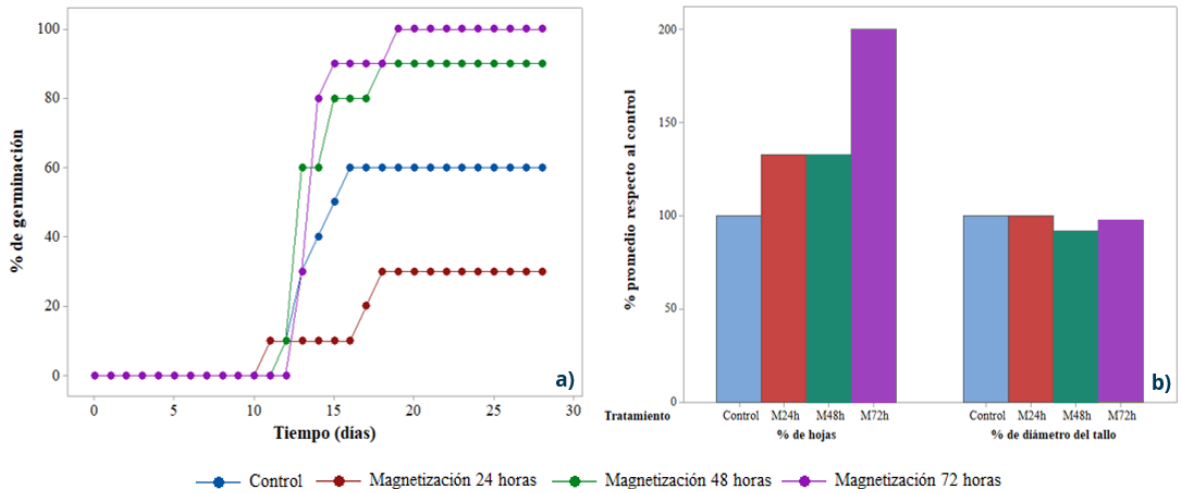


Figura 5. Gráficas de porcentaje de tasa de germinación contra días transcurridos (a), número de hojas y ancho de tallo (b) con respecto al control de chile serrano.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la exposición de semillas de *Capsicum annuum* a un campo magnético estático genera efectos positivos tanto en la germinación como en el desarrollo inicial de las plántulas. Este comportamiento es consistente con lo reportado en diversos estudios previos, donde se ha demostrado que los campos magnéticos pueden actuar como un agente bioestimulante capaz de modificar procesos fisiológicos clave durante las primeras etapas del desarrollo vegetal.

Uno de los efectos más notorios observados fue la aceleración en la germinación, particularmente en los tratamientos de mayor tiempo de exposición. Este fenómeno ha sido previamente descrito por Vashisth y Nagarajan (2010), quienes señalaron que la exposición a campos magnéticos puede incrementar la actividad de enzimas hidrolíticas como la α-amilasa, facilitando la movilización de reservas y acelerando el proceso de imbibición. Este mecanismo podría explicar la rápida emergencia observada en las semillas tratadas, así como el alto porcentaje de germinación alcanzado en variedades como chile serrano y chile de árbol.

Adicionalmente, el incremento en el vigor de las plántulas, reflejado en un mayor número de hojas y un aumento en el grosor del tallo, sugiere que el campo magnético no solo influye en la germinación, sino también en procesos posteriores de crecimiento. Flórez et al. (2007) reportaron que la exposición a campos magnéticos puede inducir cambios en la división y elongación celular, lo que se traduce en un desarrollo más robusto de los tejidos vegetales. Este efecto coincide con el incremento del 145% en el grosor del tallo observado en chile jalapeño y el aumento significativo en el número de hojas en chile serrano.

Otro aspecto relevante es la posible influencia del campo magnético en el balance hormonal de la planta. Estudios como el de Martínez et al. (2009) sugieren que la estimulación magnética puede modificar la síntesis y actividad de fitohormonas como auxinas y giberelinas, las cuales están directamente relacionadas con el crecimiento celular y la diferenciación de tejidos. Esto podría explicar las diferencias observadas entre los tratamientos y los controles, así como la respuesta dependiente del tiempo de exposición.

Asimismo, el hecho de que los tratamientos más prolongados (72 horas) presenten los efectos más marcados sugiere una relación directa entre el tiempo de exposición y la magnitud de la respuesta fisiológica. Este comportamiento también ha sido reportado por Ahamed et al. (2013), quienes observaron mejoras significativas en el crecimiento de *Capsicum annuum* al incrementar el tiempo de exposición al campo magnético. Sin embargo, es importante considerar que existe un umbral óptimo, ya que exposiciones excesivas podrían generar efectos negativos o nulos.

Por otro lado, la variabilidad en la respuesta entre las diferentes variedades evaluadas indica que la sensibilidad al campo magnético puede depender de factores genéticos propios de cada cultivo. Esto coincide con lo reportado por Ospina-Salazar et al. (2022), quienes encontraron respuestas diferenciadas en cultivos de chile bajo tratamientos relacionados con magnetismo, lo que resalta la necesidad de establecer protocolos específicos para cada especie o variedad.

En conjunto, los resultados obtenidos en este trabajo confirman que la estimulación con campos magnéticos puede considerarse una herramienta prometedora para mejorar el establecimiento inicial de cultivos hortícolas. No obstante, aún es necesario profundizar en los mecanismos biofísicos involucrados y en la estandarización de parámetros como intensidad, tiempo de exposición y condiciones ambientales, con el fin de optimizar su aplicación a nivel agrícola.

CONCLUSIONES

La exposición de semillas de *Capsicum annuum* a un campo magnético estático de 90 mT (±10 mT) generó efectos positivos y consistentes tanto en la germinación como en el desarrollo inicial de las plántulas. En particular, los tratamientos de mayor duración (72 horas) mostraron las respuestas más significativas, destacando una germinación más rápida y uniforme, así como incrementos considerables en el número de hojas y el grosor del tallo.

Estos resultados evidencian que la estimulación magnética no solo favorece la activación de procesos fisiológicos asociados a la germinación, sino que también promueve un crecimiento más vigoroso en etapas tempranas del desarrollo vegetal. La respuesta observada en las diferentes variedades sugiere que el efecto del campo magnético puede variar en función de las características genéticas de cada cultivo, lo que abre la posibilidad de diseñar tratamientos específicos para maximizar su eficiencia.

Asimismo, el carácter no invasivo, de bajo costo y fácil implementación de esta técnica la posiciona como una alternativa viable dentro de los enfoques de agricultura sustentable, al reducir la dependencia de insumos químicos y mejorar el establecimiento de los cultivos desde la etapa de semilla.

No obstante, es necesario continuar con investigaciones que permitan profundizar en los mecanismos biofísicos involucrados, así como en la optimización de parámetros como la intensidad del campo, el tiempo de exposición y las condiciones de aplicación. De igual manera, se recomienda evaluar el impacto de estos tratamientos en etapas posteriores del desarrollo, incluyendo la producción y calidad de los frutos, con el fin de validar su aplicabilidad a escala agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahamed, M. E. M., Elzaawely, A. A., & Bayoumi, Y. A. (2013). Effect of magnetic field on seed germination, growth and yield of sweet pepper (Capsicum annuum L.).
2. Florez, M., Carbonell, M. V., & Martínez, E. (2007). Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth. Environmental and experimental botany, 59(1), 68-75.
3. Martinez, E., Carbonell, M. V., Florez, M., Amaya, J. M., & Maqueda, R. (2009). Germination of tomato seeds [Lycopersicon esculentum L.] under magnetic field. International Agrophysics, 23(1), 45-49.
4. Ospina-Salazar, D., Cortez-Hernández, L., Benavides-Bolaños, J., & Zúñiga-Escobar, O. (2022). Fruit yield of tabasco pepper under water deficit with magnetically treated water. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 23(2).
5. Vashisth, A., & Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (Helianthus annuus) seeds exposed to static magnetic field. Journal of plant physiology, 167(2), 149-156.

EFECTOS BIOESTIMULANTES DEL NEODIMIO EN PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS Y CONCENTRACIÓN DE NITRATO EN LECHUGA HIDROPÓNICA

Imelda Rueda-López; Libia Iris Trejo-Téllez; Fernando Carlos Gómez-Merino

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.
rueda.imelda@colpos.mx

RESUMEN

Los bioestimulantes vegetales han adquirido gran relevancia como insumos fundamentales en la agricultura sostenible debido a su capacidad para mejorar el crecimiento, la eficiencia en el uso de nutrientes y la tolerancia al estrés abiótico. Dentro de los bioestimulantes inorgánicos, los lantánidos se perfilan como alternativas emergentes, ya que inducen respuestas fisiológicas favorables, como el aumento de la germinación, el desarrollo radicular y la síntesis de metabolitos secundarios, lo que contribuye a incrementar la productividad y calidad de los cultivos. El neodimio (Nd), un elemento considerado beneficioso, ha demostrado efectos positivos en diversos cultivos, asociados con la estimulación del crecimiento y la absorción de nutrimentos. En esta investigación se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de Nd (0, 20, 40 y 60 µM) adicionadas a la solución nutritiva en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Starfighter cultivada en un sistema hidropónico de raíz flotante. Los tratamientos se aplicaron durante 48 días y, al final del periodo experimental, se determinaron las concentraciones de clorofila total, carotenoides y nitrato en el tejido vegetal. Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) con el paquete estadístico SAS. Con la dosis de 60 µM Nd se registraron las mayores concentraciones de clorofila total y carotenoides, con incrementos de 26.9 y 53%, respectivamente, en comparación con el testigo. Asimismo, este tratamiento redujo la concentración de nitrato en 46.6%, con respecto a las plantas tratadas sin Nd. Los resultados indican que el Nd a 60 µM mejora el estado fisiológico de las plantas y disminuye la acumulación de nitrato, evidenciando su potencial como agente bioestimulante en la producción hidropónica de lechuga.

INTRODUCCIÓN

El neodimio (Nd) pertenece al grupo de elementos de tierras raras (ETR), que incluye a lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), prometio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb), lutecio (Lu), escandio (Sc) e itrio (Y) (Gómez-Merino *et al*., 2023). Los ETR no son considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas; sin embargo, cuando se aplican en concentraciones adecuadas, promueven crecimiento vegetal, absorción de nutrimentos, actividad fotosintética y la tolerancia al estrés abiótico (Ozturk *et al*., 2023; Kaur *et al*., 2024). Debido a estos efectos benéficos, algunos ETR han sido clasificados como bioestimulantes inorgánicos con potencial aplicación en sistemas agrícolas sostenibles (Ayub *et al*., 2023).

El neodimio (Nd) ha despertado particular interés debido a su capacidad para estimular diversos procesos fisiológicos asociados con el metabolismo vegetal. Investigaciones recientes realizadas en sistemas hidropónicos demostraron que la aplicación de Nd incrementa significativamente el crecimiento vegetal, desarrollo foliar y la acumulación de biomasa en especies de importancia económica, sugiriendo que estos efectos están ligados a optimizaciones en la captación y utilización de la energía fotosintética (Ramírez-Antonio *et al*., 2023; Rueda-López *et al*., 2024). Los pigmentos fotosintéticos son componentes esenciales del aparato fotosintético. Las clorofilas *a* y *b* participan directamente en la absorción y transferencia de energía luminosa durante las reacciones fotoquímicas, mientras que los carotenoides desempeñan funciones fotoprotectoras al disipar el exceso de energía y mitigar el daño oxidativo (Simkin *et al*., 2022).

Por otra parte, la acumulación excesiva de nitrato constituye uno de los principales problemas de calidad e inocuidad en las hortalizas de hoja, particularmente en lechuga (*Lactuca sativa* L.), debido

a su elevada capacidad para absorber, transportar y almacenar nitrógeno (N) en forma de nitrato en los tejidos foliares (Bian *et al*., 2020; Dodocioiu *et al*., 2025). El consumo de vegetales con concentraciones elevadas de nitrato representa una preocupación para la salud pública, debido a que parte del nitrato ingerido puede reducirse a nitrito y participar posteriormente en la formación de compuestos N-nitrosos potencialmente carcinogénicos (Dodocioiu *et al*., 2025).

A pesar de los avances en el estudio de los efectos bioestimulantes del Nd en el desarrollo y la nutrición vegetal, la evidencia científica respecto a su influencia en la dinámica de los pigmentos fotosintéticos y la asimilación de nitrato en hortalizas de hoja bajo sistemas hidropónicos es limitada. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Nd adicionadas a la solución nutritiva en la concentración de clorofila total, carotenoides y nitrato en plantas de lechuga cv. Starfighter cultivadas en un sistema hidropónico de raíz flotante.

PARTE EXPERIMENTAL

Ubicación

El experimento se desarrolló en un invernadero, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, en Montecillo, Estado de México.

Material vegetal y condiciones de crecimiento

Plántulas de lechuga cv. Starfighter de 40 d de edad, se establecieron en un sistema hidropónico de raíz flotante, en contenedores de plástico de 900 mL de capacidad, con un sistema de oxigenación programado cada 3 h con tiempos de oxigenación de 15 min. La nutrición se suministró con la Solución Nutritiva Universal Steiner, durante los primeros 10 d a una concentración del 50%, posteriormente y hasta la cosecha se aportó al 100% (Steiner, 1984).

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Las dosis de Nd evaluadas fueron 0, 20, 40 y 60 µM, aplicado como $NdCl_3$ $6H_2O$ (Sigma-Aldrich; Saint Louis, MO, EE. UU) a la solución nutritiva. La unidad experimental fue una planta de lechuga colocada en el contenedor antes descrito. Los tratamientos iniciaron en plantas de 50 d y fueron aplicados por 48 d, el agua evaporada se repuso cada 3 d. El pH de la solución se ajustó a 5.5 usando H_2SO_4 1 N.

Variables evaluadas

Al finalizar la cosecha se realizaron las siguientes determinaciones. La concentración de clorofila total y carotenoides se cuantificó mediante el método descrito por Sumanta *et al*. (2014), utilizando tejido foliar fresco extraído con acetona al 80%. Las absorbancias se registraron a 470, 646.8 y 663.2 nm en un espectrofotómetro (Jenway 6715 UV/Vis; Staffordshire, Reino Unido). La concentración de nitrato se determinó en muestras de tejido foliar seco y molido mediante el método colorimétrico de ácido salicílico descrito por Cataldo *et al*. (1975), registrando la absorbancia a 410 nm, en el espectrofotómetro antes descrito.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), para lo cual se utilizó el software estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2009) versión 9.4.1

RESULTADOS

Los ETR estimulan la fotosíntesis, la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII), el transporte fotosintético de electrones y la síntesis de clorofilas (Kovařiková *et al*., 2019). En caña de azúcar (*Saccharum* spp.) las concentraciones de clorofilas *a*, *b* y total incrementaron en 325.7, 229.1 y 291.3%, respectivamente, con el suministro de 150 µM Nd; a su vez, la concentración de carotenoides fue superior en 102.4% con la dosis 100 µM Nd, en todos los casos en comparación con el testigo sin Nd (Ramírez-Antonio *et al*., 2023). Resultados similares se encontraron en esta

investigación, donde plantas de lechuga tratadas con 60 µM Nd incrementaron las concentraciones de clorofila total y carotenoides en 26.9 y 53%, respectivamente, en comparación con el testigo (Figura 1A-B).

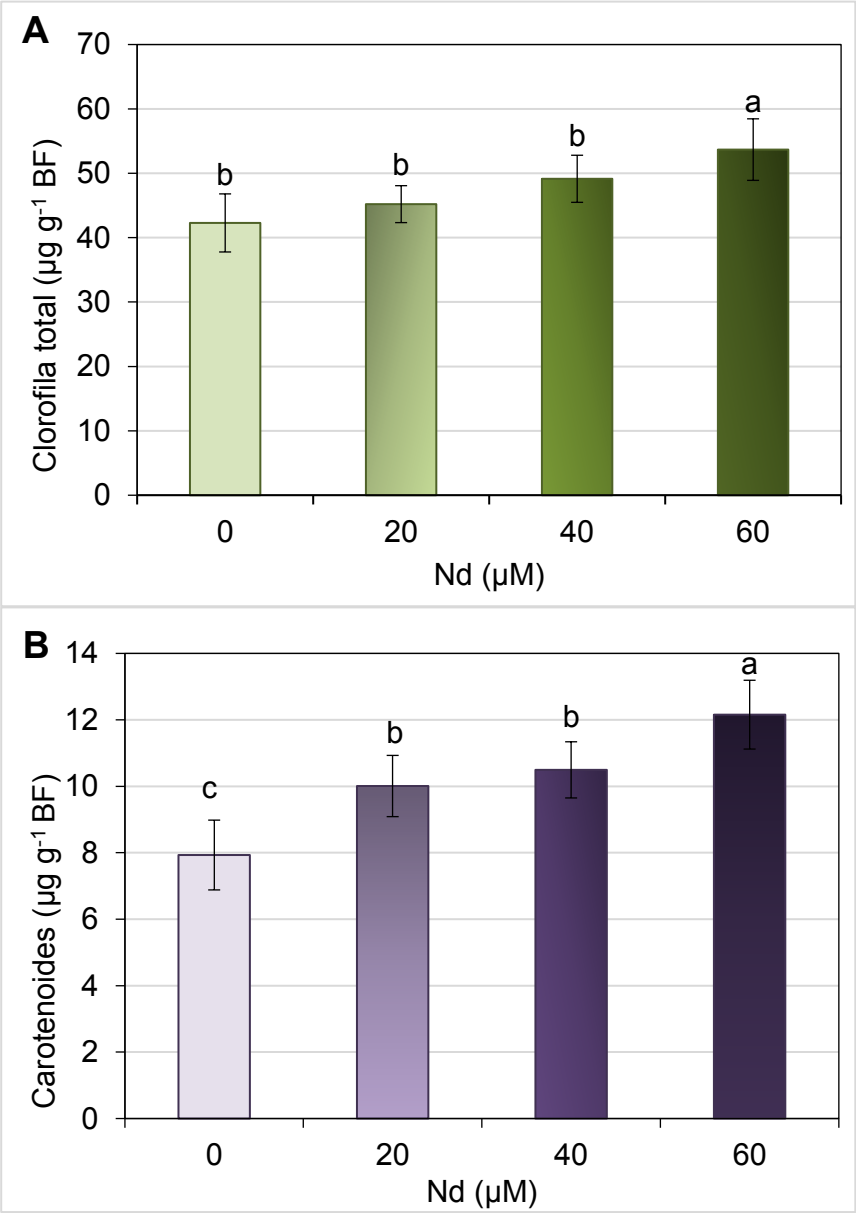


Figura 1. Efecto de diferentes dosis de neodimio (Nd) en la concentración foliar de clorofila total (A) y carotenoides en lechuga cv. Starfighter. Medias ± DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). BF = biomasa fresca.

Por su parte, la concentración de nitrato en plantas tratadas con 60 µM Nd se redujo 46.6% con respecto al testigo (Figura 2). Los ETR promueven la actividad de enzimas implicadas en la reducción de nitrato y la asimilación de N (Yin *et al*., 2009), lo que podría explicar la disminución de la concentración de nitrato en las plantas de lechuga. En plantas de col china (*Brassica chinensis* L.), la aplicación de 714 µM Ce disminuyó la concentración de nitrato en 18.5% con respecto al testigo (Ma *et al*., 2014), lo cual coincide con los resultados observados en el presente estudio.

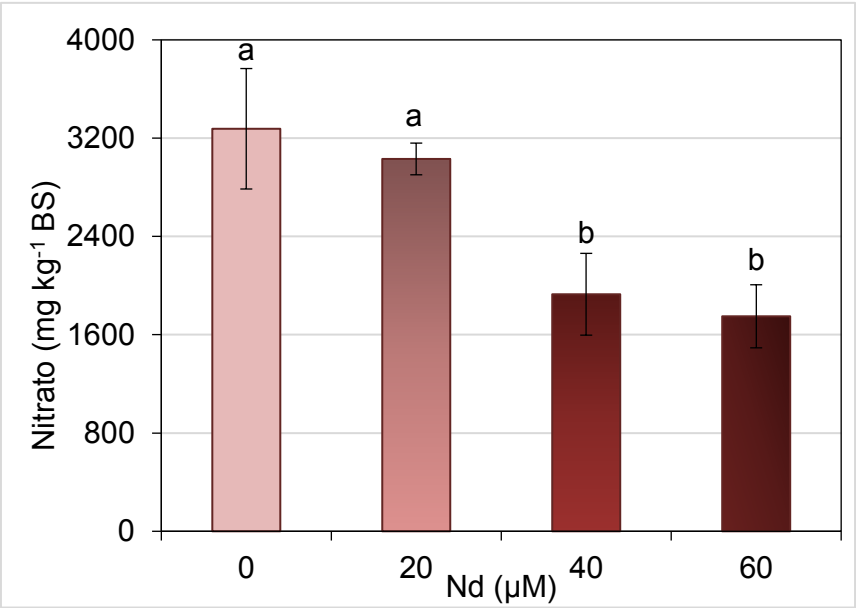


Figura 2. Concentración de nitrato en lechuga cv. Starfighter tratada con diferentes dosis de neodimio (Nd). Medias ± DE con letras distintas, indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$). BS = biomasa seca.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que la aplicación de Nd a 60 µM mejoró la calidad fisiológica y nutritiva de la lechuga cultivada en hidroponía, al incrementar las concentraciones de clorofila total y carotenoides, y reducir la acumulación de nitrato. En conjunto, estos hallazgos evidencian el potencial de Nd como bioestimulante en la producción hidropónica de lechuga.

BIBLIOGRAFÍA

1. Steiner, “The universal nutrient solution”, in *6th International Congress on Soilless Culture*, Wageningen, The Netherlands, 1984, pp. 633-650.
2. D. A. Cataldo, M. Haroon, L. E. Schrader, V. L. Youngs, “Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid”, Commun. Soil Sci. Plant Anal., Vol. 6, 1, 1975, pp. 71-80.
3. F. C. Gómez-Merino, L. F. Gómez-Trejo, R. Ruvalcaba-Ramírez, L. I. Trejo-Téllez, “Lanthanides as beneficial elements for plants”, in *Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent Developments and Future Prospects*, S. Pandey, D. K. Tripathi, V. P. Singh, S. Sharma, D. K. Chauhan (eds.), 2023, pp. 349-369.
4. Rueda-López, L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, M. G. Peralta-Sánchez, and S. M. Ramírez-Olvera, “Neodymium and zinc stimulate growth, biomass accumulation and nutrient uptake of lettuce plants in hydroponics”, *Folia Horticulturae*, Vol. 36, 2, 2024, pp. 283-297.
5. J. Ma, Y. Ren, L. Yan, “Effects of spray application of lanthanum and cerium on yield and quality of Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) based on different seasons”, Biol. Trace Elem. Res., Vol. 160, 3, 2014, pp. 427-432.
6. J. Simkin, L. Kapoor, C. G. P. Doss, T. A. Hofmann, T. Lawson, S. Ramamoorthy, “The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta”, Photosynth. Res., Vol. 152, 1, 2022, pp. 23-42.
7. L. I. Trejo-Téllez, L. F. Gómez-Trejo, F. C. Gómez-Merino, “Biostimulant effects and concentration patterns of beneficial elements in plants,” in *Beneficial Chemical Elements of Plants: Recent Developments and Future Prospects*, S. Pandey, D. K. Tripathi, V. P. Singh, S. Sharma, D. K. Chauhan (eds.), 2023, pp. 58-102.

8. M. A. Ayub, M. Abbas, M. Z. ur Rehman, “Role of inorganic bio stimulant elements in plant growth”, Sust. Plant Nutr., 2023, pp. 229-261.
9. M. Dodocioiu, G. D. Buzatu, M. Botu, “Nitrates and nitrites in vegetables and the health risk”, Foods, Vol. 14, 17, 2025, 3037.
10. M. Kovaříková, I. Tomášková, P. Soudek, “Rare earth elements in plants”, Biol. Plant., Vol. 63, 1, 2019, pp. 20-32.
11. M. Ozturk, M. Metin, V. Altay, M. N. V. Prasad, A. Gul, R. A. Bhat, M. A. Darvash, M. Hasanuzzaman, K. Nahar, D. Unal, B. T. Unal, P. García-Caparrós, T. Kawano, K. Toderich, A. Shahzadi, “Role of rare earth elements in plants”, Plant Mol. Biol. Rep., Vol. 41, 3, 2023, pp. 345-368.
12. N. U. Basar, M. A. Shahid, A. S. B. Primo, D. M. Kadyampakeni, “Synergies between biostimulants and plant nutrients: A review of ecofriendly nutrient management in crop production”, Discover Agric., Vol. 3, 1, 2025, 150.
13. P. Kaur, M. Mahajan, H. Gambhir, A. Khan, M. I. R. Khan, “Rare earth metallic elements in plants: Assessing benefits, risks and mitigating strategies”, Plant Cell Rep., Vol. 43, 9, 2024, 216.
14. SAS Institute Inc., *SAS/STAT Software: Changes and Enhancements, Release 6.10*, SAS Institute Inc., Cary, NC, 2009.
15. S. Sumanta, C. I. Haque, J. Nishika, and R. Suprakash, “Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents”, Res. J. Chem. Sci., Vol. 4, 9, 2014, pp. 63-69.
16. S. Yin, Y. Ze, C. Liu, N. Li, M. Zhou, Y. Duan, F. Hong, “Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency”, Biol. Trace Elem. Res., Vol. 132, 1, 2009, pp. 247-258.
17. V. J. Ramírez-Antonio, L. I. Trejo-Téllez, F. C. Gómez-Merino, J. V. Hidalgo-Contreras, “Neodymium stimulates growth, nutrient concentration, and metabolism in sugarcane in hydroponics”, Sugar Tech, Vol. 25, 6, 2023, pp. 1385-1395.
18. Z.Bian, Y. Wang, X. Zhang, T. Li, S. Grundy, Q. Yang, R. Cheng, “A review of environment effects on nitrate accumulation in leafy vegetables grown in controlled environments”, Foods, Vol. 9, 6, 2020, 732.

PAPAÍNA COMO ALTERNATIVA BIOTECNOLÓGICA EN EL CONTROL *IN VITRO* DE *Staphylococcus Aureus* ASOCIADO A MASTITIS BOVINA

Margarita Salgado Armas[1], María Liliana Hernández Pérez [1] y Elena Escobar Garduño [2]

Universidad Interserrana del Estado de Puebla Chilchotla, [1] Academia de Ingeniería en Desarrollo Sustentable con Orientación en Veterinaria y Zootecnia, [2] Ingeniería Agroindustrial.
maria_hernandez@uich.edu.mx, elena_escobar@uich.edu.mx

RESUMEN

La mastitis bovina es una enfermedad infectocontagiosa de alto impacto económico en la producción láctea, debido a la disminución en el rendimiento, alteraciones en la calidad de la leche y recurrencia de infecciones intramamarias. Entre los agentes asociados, *Staphylococcus aureus* representa un problema relevante por su capacidad para formar biopelículas y presentar resistencia a antibióticos convencionales. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de la papaína como alternativa biotecnológica para el control in vitro de *S. aureus* aislado de muestras de mastitis bovina. La papaína se obtuvo a partir de frutos verdes de *Carica papaya* mediante trituración mecánica, filtración, precipitación alcohólica con etanol al 96 % y decantación. Los aislamientos bacterianos provinieron de muestras positivas a la prueba de California, se cultivaron en agar LB y se evaluaron mediante pruebas de inhibición con discos de papel filtro, utilizando penicilina como control positivo y suero fisiológico como control negativo. Los resultados mostraron una respuesta heterogénea: la papaína generó halos de inhibición en algunos aislamientos, mientras que en otros no presentó efecto evidente. De diez muestras analizadas, una presentó resistencia tanto a penicilina como a papaína. Estos resultados sugieren que la papaína puede constituir una alternativa natural prometedora, aunque requiere mayor estandarización, medición cuantitativa de halos y evaluación en un número más amplio de aislamientos.

INTRODUCCIÓN

La mastitis bovina es considerada una de las enfermedades de mayor relevancia sanitaria y económica en la industria lechera. Su presencia se asocia con pérdidas por reducción en la producción, descarte de leche, gastos veterinarios, tratamientos antimicrobianos y afectaciones en la calidad físico-química del producto (Chisag y Villavicencio, 2026; Guzmán-Rodríguez et al, 2021; Vargas et al, 2020). Dentro de los agentes etiológicos implicados, *Staphylococcus aureus* destaca por su capacidad de persistir en la glándula mamaria, generar infecciones crónicas y complicar la respuesta terapéutica.

La importancia de *S. aureus* radica en su habilidad para formar biopelículas, estructuras que protegen a las bacterias frente a condiciones adversas y reducen la eficacia de distintos antibióticos. Esta característica favorece infecciones recurrentes, incrementa el riesgo de resistencia antimicrobiana y limita el éxito de los tratamientos convencionales (Guzmán-Rodríguez et al, 2021). En este contexto, la búsqueda de alternativas naturales y biotecnológicas resulta prioritaria para disminuir la dependencia de antibióticos sintéticos en sistemas de producción animal.

La papaína es una enzima proteolítica obtenida principalmente del látex y tejidos de frutos de *Carica papaya* L. Diversos estudios la describen como una enzima de interés biológico por su capacidad para hidrolizar proteínas, participar en procesos de limpieza tisular y mantener actividad en diferentes condiciones de pH (Amri y Mamboya, 2012, Mera y Barba, 2018).

Debido a estas propiedades, su aplicación como agente de apoyo frente a bacterias asociadas a mastitis bovina puede representar una estrategia alternativa para el control de patógenos y la reducción de residuos farmacológicos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de la papaína purificada como alternativa biotecnológica en el control *in vitro* de *Staphylococcus aureus* asociado a mastitis bovina, mediante pruebas de inhibición en agar, con el propósito de generar evidencia preliminar que permita proponer nuevas estrategias para mejorar la salud mamaria en bovinos lecheros.

TEORÍA

Mastitis bovina y resistencia antimicrobiana

La mastitis bovina se presenta como una inflamación de la glándula mamaria ocasionada, en la mayoría de los casos, por agentes bacterianos. Entre ellos, *S. aureus* posee relevancia particular por su capacidad para permanecer en el tejido mamario, evadir mecanismos de defensa y generar infecciones persistentes. La resistencia a antibióticos y la formación de biopelículas son dos factores que dificultan su control, ya que reducen la sensibilidad bacteriana y favorecen fallas terapéuticas (Guzmán-Rodríguez et al, 2021, Selim et al, 2025).

Papaína como enzima de interés biotecnológico

La papaína es una proteasa vegetal con capacidad para romper enlaces peptídicos en proteínas. Esta característica ha favorecido su empleo en aplicaciones alimentarias, farmacológicas y biotecnológicas. En el contexto microbiológico, su actividad proteolítica puede ser relevante para intervenir estructuras ricas en proteínas, modificar matrices extracelulares y contribuir al debilitamiento de biopelículas bacterianas (Amri y Mamboya, 2012, Mera y Barba, 2018). Por ello, su evaluación frente a *S. aureus* resulta pertinente como estudio preliminar de actividad antimicrobiana.

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención y purificación de papaína

Se utilizaron frutos verdes de *Carica papaya* L., los cuales fueron sometidos a trituración mecánica para favorecer la liberación del material enzimático. Posteriormente, el extracto obtenido se filtró y se realizó una precipitación alcohólica con etanol al 96 % durante 12 horas. La mezcla fue colocada en una pera de decantación para separar la fracción proteica purificada. La actividad enzimática se verificó mediante pruebas de precipitación de caseína y la enzima purificada se mantuvo en refrigeración a 4 °C hasta su uso en las pruebas de inhibición.



Figura 1. Frutos verdes de Carica papaya utilizados para la obtención de papaína.



Figura 2. Decantación de la fracción enzimática purificada.

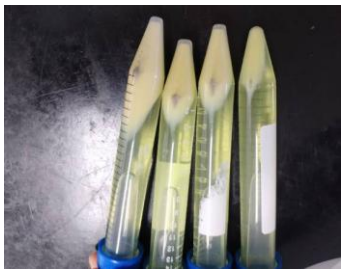


Figura 3. Enzima papaína purificada conservada en tubos.

Aislamiento bacteriano

El aislamiento de *S. aureus* se realizó a partir de muestras de mastitis bovina positivas a la prueba de California. Las muestras se cultivaron en placas con medio LB e incubaron a 37 °C durante 18 horas, hasta alcanzar crecimiento a confluencia. La verificación de los aislamientos se realizó mediante pruebas bioquímicas y tinción, con el fin de confirmar su compatibilidad con *Staphylococcus aureus*.

Pruebas de inhibición

Para evaluar la actividad antimicrobiana, se emplearon discos de papel filtro estériles colocados sobre el agar inoculado con los aislamientos bacterianos. Se utilizó papaína purificada con actividad reportada de 0.5 U/mg como tratamiento experimental, penicilina como control positivo y suero fisiológico como control negativo. Las placas se incubaron a 37 °C durante 12 horas y todas las pruebas se realizaron por triplicado. La respuesta se evaluó de manera cualitativa mediante la presencia o ausencia de halos de inhibición alrededor de los discos.

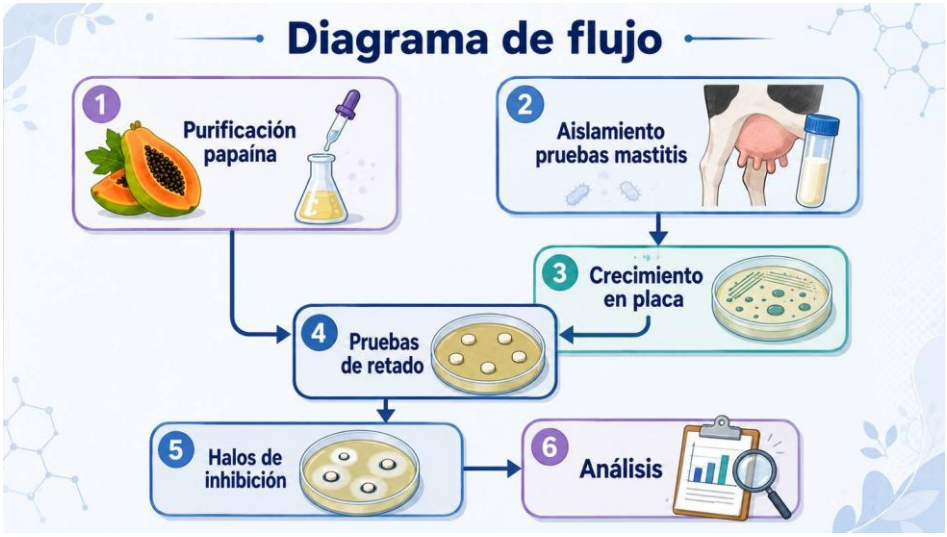


Figura 4. Diagrama general del procedimiento experimental aplicado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la etapa de purificación se obtuvo una preparación enzimática de tonalidad verde amarillenta, compatible con el material vegetal utilizado. La prueba con caseína permitió verificar la actividad proteolítica de la papaína, por lo que la enzima purificada fue considerada apta para su aplicación en los ensayos de reto antimicrobiano. Esta fase fue relevante porque la actividad proteolítica constituye el fundamento de su posible efecto sobre estructuras bacterianas y matrices asociadas a biopelículas.

En las pruebas de inhibición se observó una respuesta variable entre los aislamientos de *S. aureus*. En algunas muestras la papaína generó halos de inhibición visibles e incluso superiores a los observados con el control positivo de penicilina. Sin embargo, en otros aislamientos el tratamiento con papaína no produjo inhibición evidente, lo que indica que su efecto no fue uniforme para todas las cepas evaluadas. De las diez muestras analizadas, una presentó resistencia tanto a penicilina como a papaína.

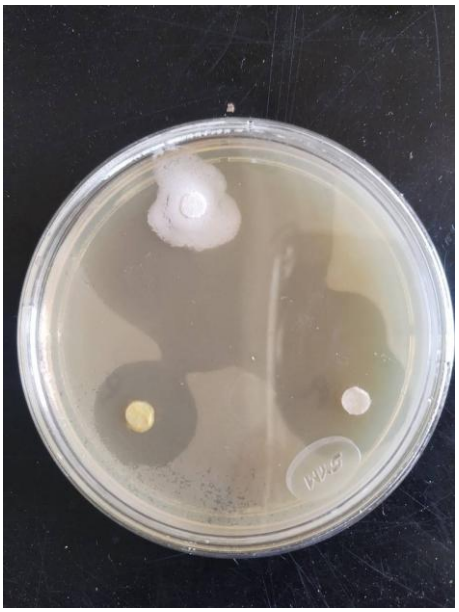


Figura 5. Prueba de inhibición en muestra 09: A) control positivo, B) control negativo, C) papaína.



Figura 6. Prueba de inhibición en muestra 02: A) control positivo, B) control negativo, C) papaína.

La variabilidad observada puede explicarse por diferencias entre aislamientos bacterianos, nivel de susceptibilidad, posible capacidad de formación de biopelículas y concentración efectiva de la enzima en cada disco. La literatura señala que *S. aureus* puede presentar resistencia antimicrobiana y comportamientos diferenciales relacionados con la formación de biopelículas (Guzmán-Rodriguez et al, 2021, Selim et al, 2015). En consecuencia, aunque la papaína mostró potencial inhibitorio en algunos casos, su eficacia debe interpretarse como preliminar y dependiente del aislamiento evaluado.

Los resultados respaldan el interés de estudiar enzimas naturales como posibles herramientas complementarias en el control de mastitis bovina. La papaína, por su naturaleza proteolítica, podría contribuir a alterar componentes proteicos de la matriz bacteriana y favorecer el control de cepas susceptibles (Amri y Mamboya,2012). No obstante, se sugiere medir los diámetros de los halos en milímetros, comparar concentraciones de papaína, determinar concentración mínima inhibitoria, evaluar actividad frente a biopelículas y ampliar el número de aislamientos analizados.

Una limitación importante del estudio es que los resultados reportados son principalmente cualitativos. La presencia de halos de inhibición permite identificar un efecto antimicrobiano preliminar, pero no permite establecer con precisión la magnitud de la actividad ni comparar estadísticamente la papaína contra los controles. Por ello, los hallazgos deben considerarse una aproximación inicial para orientar estudios posteriores bajo condiciones más estandarizadas.

CONCLUSIONES

La papaína purificada a partir de frutos verdes de *Carica papaya* mostró potencial como alternativa biotecnológica para el control in vitro de algunos aislamientos de *Staphylococcus aureus* asociados a mastitis bovina. Las pruebas de inhibición evidenciaron respuestas variables: en ciertos casos se observaron halos de inhibición con papaína, mientras que en otros no se presentó efecto antimicrobiano visible. De diez muestras evaluadas, una mostró resistencia tanto a penicilina como a papaína, lo que confirma la necesidad de ampliar el análisis con un mayor número de aislamientos. En conjunto, los resultados sugieren que la papaína puede ser una opción natural prometedora, pero requiere estandarización metodológica, medición cuantitativa de halos, evaluación de

concentraciones y estudios específicos sobre biopelículas antes de considerarse una alternativa aplicable en programas de control de mastitis bovina.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chisag Chisag, M. L., & Villavicencio Villavicencio, B. J. (2026). Staphylococcus aureus meticilino resistente en bovinos lecheros: situación actual y desafíos en la producción láctea. Universidad & Ciencia, 15(1), e9123. https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/9123
2. Guzmán-Rodríguez, J. J., Salinas-Pérez, E., León-Galván, F., Barboza-Corona, J. E., Valencia-Posadas, M., Ávila-Ramos, F., Hernández-Marín, J. A., Ramírez-Sáenz, D., & Gutiérrez-Chávez, A. J. (2021). Relationship between antibiotic resistance and biofilm formation of Staphylococcus aureus isolates from bovine mastitis. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 12(4), 1117-1132. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i4.5645
3. Vargas, M. J., Sifuentes-Saucedo, D. M., Vargas López, S., Rodríguez Ortega, L. T., & Noguez-Estrada, J. (2020). Impacto económico de la mastitis en la lechería familiar del Valle del Mezquital, Hidalgo. Revista Mexicana de Agroecosistemas, 8, 172-178.
4. Amri, E., & Mamboya, F. (2012). Papain, a plant enzyme of biological importance: A review. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 8(2), 99-104. https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2012.99.104
5. Mera Ponce, S., & Barba, D. (2018). Evaluación de la concentración enzimática en hojas, corteza y látex de la papaya y su efecto ablandador en carne bovina. Novasinergia, 1(1), 72-79. https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.01.09
6. Selim, A., Marzok, M., Gattan, H. S., & Hereba, A. M. (2025). Prevalence of Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus (MRSA) in Egyptian water buffaloes and risk factors for subclinical mastitis. Transboundary and Emerging Diseases, 2025(1), 8862271. https://doi.org/10.1155/tbed/8862271

POTENCIAL DEL HUAUZONTLE (*Chenopodium Berlandieri Subsp. Nuttalliae*) COMO CULTIVO TOLERANTE A LA SALINIDAD

Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade[1], Libia Iris Trejo-Téllez[1,2], Fernando Carlos Gómez-Merino[2], Britany Guadalupe Muñoz-Muñoz[1], Helí Anibal López-Rosano[2]

[1]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. [2]Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.
hernandez.erendira@colpos.mx

RESUMEN

La salinidad del suelo constituye un estrés abiótico que limita el crecimiento vegetal mediante la reducción del potencial osmótico y la toxicidad iónica por Na^+ y Cl^-. En este contexto, la identificación de especies y materiales vegetales con tolerancia a la salinidad representa una alternativa para el uso productivo de suelos afectados. El huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) es un quelite nativo de México perteneciente a la familia Amaranthaceae. Estudios previos han mostrado su capacidad de germinar bajo concentraciones moderadas de NaCl sobre el crecimiento inicial de plántulas, pero la información aúln es limitada. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de NaCl sobre el crecimiento de plántulas de huauzontle de distinto origen. El experimento se condujo bajo condiciones controladas, con semillas de Puebla, Morelos, Tlaxcala y CDMX. Las semillas se sembraron en macetas de 64 mL con una mezcla de tezontle y turba en proporción 1:2 (v:v; porosidad 76 %). Durante los primeros 15 dds, las plántulas se irrigaron con agua y posteriormente con solución nutritiva Steiner al 50 %. A los 46 dds se aplicaron concentraciones de NaCl (0, 150, 300 y 450 mM) más la solución nutritiva al 100 %. Se evaluaron la altura de planta y el número de hojas a los 46, 53, 60 y 67 dds, así como el peso fresco, seco de hoja y tallo y el índice de área foliar (IAF), bajo un diseño en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. La altura de planta y el número de hojas aumentaron conforme avanzó el tiempo en todos los cultivares; sin embargo, este incremento disminuyó de manera consistente al aumentar la concentración de NaCl. En ausencia de NaCl, el cultivar Morelos presentó una altura de 11.13 cm, mientras que CDMX registró valores más bajos, alrededor de 9.68 cm. Tlaxcala y Puebla mostraron valores intermedios (10 cm). A 450 mM NaCl, la altura disminuyó en todos los cultivares; no obstante, Morelos mantuvo valores cercanos a 11 cm, en contraste con CDMX, que presentó aproximadamente 9.2 cm. El número de hojas mostró una tendencia similar, con valores cercanos a 10 hojas en Morelos y Tlaxcala y valores menores en CDMX bajo concentraciones altas de NaCl. El peso fresco, seco de hoja y tallo disminuyó conforme aumentó la concentración de NaCl en todos los cultivares. En ausencia de salinidad, Morelos presentó los mayores valores de biomasa fresca en hoja (1.3 g) , mientras que CDMX mostró los más bajos (0.9 g). El IAF fue mayor sin NaCl y disminuyó progresivamente con la salinidad. En conclusión, la salinidad redujo el crecimiento y la biomasa de las plántulas de huauzontle, con efectos más marcados a 300 y 450 mM de NaCl.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una amenaza creciente para la agricultura mundial debido al incremento de diversos factores de estrés abiótico que limitan la productividad de los cultivos (Sánchez-Bermúdez *et al*., 2022). Entre ellos, la salinidad del suelo constituye uno de los problemas más importantes por su amplia distribución y por las restricciones que impone a la producción de alimentos. Se estima que aproximadamente el 33 % de la superficie terrestre representa afectaciones asociadas al estrés hídrico y salino, condición que podría intensificarse durante las próximas décadas como consecuencias de la creciente demanda de agua de alta calidad por parte de los sectores urbano e industrial (Mukhopadhyay *et al.,* 2021). Esta situación favorecerá el uso de recursos hídricos con mayores concentraciones de sales para fines agrícolas, lo que incrementará la superficie cultivable expuesta a este problema (Otlewska *et al*., 2020). En consecuencia, el mantenimiento de la productividad agrícola en ambientes salinos constituye uno de los principales desafíos para la seguridad alimentaria global (Munns *et al*., 2020).

Los suelos salinos se caracterizan por la acumulación de sales solubles compuestas principalmente por cationes como sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), y magnesio (Mg^{2+}), así como aniones tales como cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y nitrato (NO_3^-). De manera general, un suelo se considera salino cuando la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (EC_e) es superior a 4 dS m^{-1}, valor equivalente a aproximadamente a 40 mM NaCl (Hopmans *et al*., 2021; Ismayilov *et al*., 2021). La acumulación excesiva de sales reduce la disponibilidad de agua para las plantas, altera la absorción y distribución de nutrientes, provoca toxicidad iónica y deteriora las propiedades físicas del suelo, factores que en conjunto limitan el establecimiento, crecimiento y rendimiento de los cultivos (Shrivasta y Kumar, 2014).

La respuesta de las plantas frente a la salinidad involucra modificaciones fisiológicas, bioquímicas y moleculares destinadas a mantener la homeostasis celular bajo condiciones restrictivas (Vaishnav *et al*., 2016). Sin embargo, la eficacia de estos mecanismos depende de la especie, el genotipo, la intensidad del estrés, el tiempo de exposición y la etapa de desarrollo en la que ocurre la perturbación (Meng *et al*., 2018).

Asimismo, las fases iniciales del ciclo biológico suelen ser particularmente sensibles, ya que la disponibilidad de agua resulta determinante para la germinación y el establecimiento de las plántulas. En consecuencia, numerosos estudios han documentado reducciones en la germinación y en el crecimiento inicial de diversas especies cultivadas cuando se expone a elevadas concentraciones de NaCl. En quinoa variedad BO78, Ruiz-Carrasco *et al*. (2011) reportaron disminuciones significativas en la germinación y en la longitud del brote, así como una marcada inhibición del crecimiento radical a una concentración de 300 mM NaCl.

Ante el avance de la salinización de los suelos agrícolas, la búsqueda de especies con capacidad de adaptación a estas condiciones ha adquirido especial relevancia. En este contexto, los cultivos subutilizados representan una fuente valiosa de diversidad genética que podría contribuir al desarrollo de sistemas productivos más resilientes frente a factores de estrés abiótico (Tian *et al*., 2022). Entre ellos destaca el huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*), un quelite nativo de México perteneciente a la familia Amaranthaceae, reconocido por su valor nutricional y su importancia cultural. Aunque algunos estudios sugieren que esta especie posee capacidad para germinar bajo concentraciones moderadas de NaCl, aún existe información limitada sobre la respuesta de materiales de diferente origen durante las primeras etapas de crecimiento. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de NaCl en el crecimiento de plántulas de huauzontle de distinto origen.

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal

Se utilizaron semillas de huauzontle originarias de los estados de Puebla, Tlaxcala, Morelos y Ciudad de México.

Diseño de tratamientos y diseño experimental

Las semillas se sembraron en macetas de 64 mL de capacidad con una mezcla de tezontle y turba en proporción 1:2 (v:v; porosidad 76 %). Durante los primeros 15 días después de la siembra (dds), las plántulas se irrigaron con agua y posteriormente con solución nutritiva Steiner al 50 %. A los 46 dds se aplicaron como tratamientos concentraciones de NaCl (0, 150, 300 y 450 mM) a la solución nutritiva al 100 %. Estos tratamientos se establecieron bajo un diseño en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue una maceta con cuatro plántulas.

Variables a evaluar

Se evaluaron la altura de planta y el número de hojas a los 46, 53, 60 y 67 dds, así como el peso de biomasas fresca y seca de hojas y tallos.

Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias Tukey ($p \leq 0.05$), con el programa estadístico Statistical Analysis Systems 9.4 (SAS, 2016).

RESULTADOS

La altura de planta y el número de hojas aumentaron conforme avanzó el desarrollo de las plántulas en todos los cultivares evaluados; sin embargo, la magnitud de este incremento disminuyó progresivamente a medida que se incrementó la concentración de NaCl en la solución nutritiva. La Figura 1 muestra las diferencias en el crecimiento de las plántulas de huauzontle después de 67 días de exposición al estrés salino inducido por NaCl. Uno de los efectos más tempranos de la salinidad es la reducción del crecimiento vegetal, debido principalmente a que la acumulación de sales en el suelo y el agua limita la capacidad de las plantas para absorber agua. Esta condición genera un efecto osmótico o déficit hídrico que restringe el desarrollo normal de los tejidos vegetales (Askari-Khorasgani *et al.*, 2021).

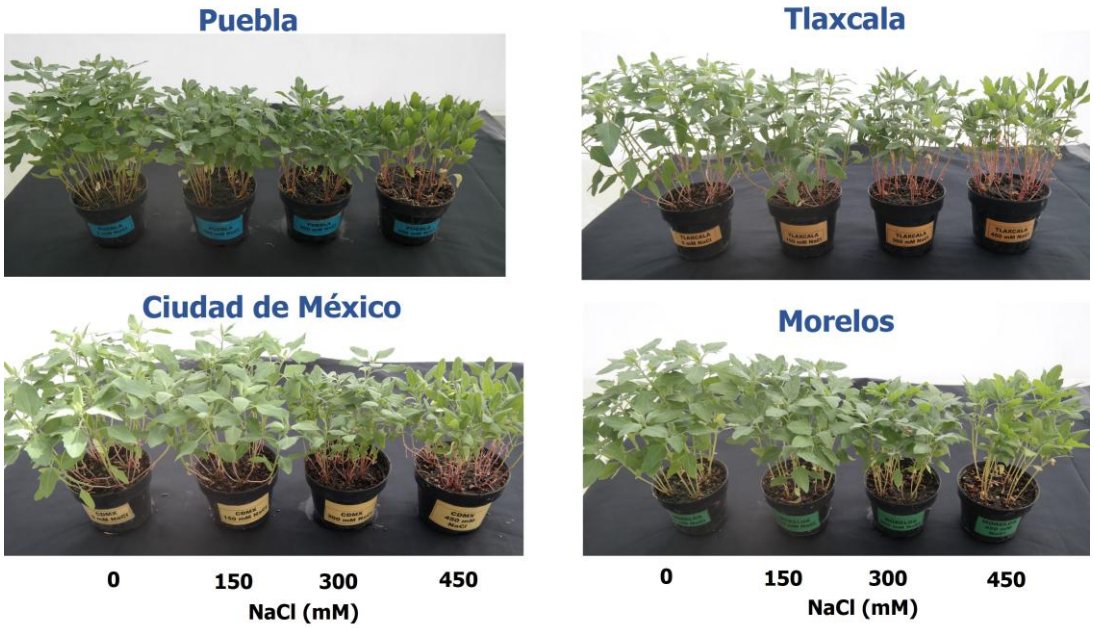


Figura 1. Efecto del estrés salino en cuatro genotipos de huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *nuttalliae*) después de 67 días después de la siembra.

En términos generales, la altura de las plántulas disminuyó conforme aumentó la concentración de NaCl. En ausencia de salinidad, el cultivar Morelos registró la mayor altura promedio (11.13 cm); mientras que, CDMX presentó el valor más bajo (9.68 cm). Los cultivares Tlaxcala y Puebla mostraron valores intermedios cercanos a 10 cm. Con la concentración más alta evaluada de NaCl (450 mM), todos los cultivares redujeron su crecimiento; no obstante, Morelos conservó alturas cercanas a 11 cm; mientras que, CDMX alcanzó aproximadamente 9.2 cm. Resultados similares fueron reportados en *Amaranthus hybridus*, donde la exposición a 450 mM NaCl provocó una disminución significativa en la altura de las plantas.

El número de hojas presentó una respuesta semejante a la observada en la altura de planta. Los cultivares Morelos y Tlaxcala mantuvieron valores cercanos a diez hojas por planta, mientras que CDMX mostró una reducción más pronunciada bajo condiciones de alta salinidad. Asimismo, el índice de área foliar (IAF) alcanzó sus valores máximos en ausencia de NaCl y disminuyó gradualmente conforme se incrementó la concentración salina. Este comportamiento puede atribuirse a que el estrés salino reduce tanto el número como el área de las hojas jóvenes y acelera

la senescencia de las hojas madurez (Pérez- Alfocea *et al.,* 2011). Además, la acumulación de iones tóxicos en la región basal de la lámina foliar limita la expansión celular y reduce el crecimiento de las hojas (Lacerda *et al*., 2003).

Diversos estudios han documentado efectos negativos de la salinidad sobre las características morfológicos de las plantas. Asghari y Ahmadvand (2018), reportaron que el estrés salino tuvo un efecto adverso en las características morfológicas de las plantas de *Aloe vera*, como el peso de las plantas, la longitud, peso de las hojas y la longitud de las raíces, lo que finalmente resulta en la pérdida del rendimiento de la planta.

La biomasa fresca y seca de hojas y tallos también mostró una disminución progresiva conforme aumentó la concentración de NaCl en todos los cultivares. En ausencia de salinidad, Morelos presentó los mayores valores de biomasa fresca foliar (1.3 g); mientras que, CDMX registró los valores más bajos (0.9 g). Estos resultados evidencian que el incremento de la salinidad limita la acumulación de biomasa, lo que confirma el efecto adverso del estrés salino en el crecimiento y desarrollo de las plántulas de huauzontle.

CONCLUSIONES

La salinidad redujo el crecimiento, el índice de área foliar y la acumulación de biomasa en las plántulas de huauzontle, con efectos más pronunciados a concentraciones de 300 y 450 mM de NaCl. No obstante, el genotipo Morelos mantuvo mayores valores de crecimiento y biomasa en comparación con los demás materiales evaluados, lo que sugiere una mayor capacidad de adaptación a condiciones de salinidad y un potencial agronómico para su establecimiento en ambientes afectados por este tipo de estrés.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ismayilov, A. Mamedov, H. Fujimaki, A. Tsunekawa, & G. Levy, “Soil salinity type effects on the relationship between the electrical conductivity and salt content for 1:5 soil-to-water extract”, Sustainability, Vol. 13, 6, 3395, 2021.
2. Otlewska, M. Migliore, K.Dybka-Stępień, A. Manfredini, K. Struszczyk-Świta, R. Napoli, A. Białkowska, L. Canfora, & F. Pinzari, “When salt meddles between plant, soil, and microorganisms”, Front. Plant Sci., Vol. 11, 553087, 2020.
3. Vaishnav, S. Kumari, S. Jain, A. Varma, N. Tuteja, D. Choudhary.”PGPR-mediated expression of salt tolerance gene in soybean through volatiles under sodium nitroprusside”. Journal of Basic Microbiology. Vol. 56. 2026, pp. 1274-1288.
4. de Lacerda, J. Cambaia, M. Antonio, H. Ruiz, J. Tarquínio. “Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress”.Environmental and Experimental Botany. Vol. 49, 2003, pp.107-120.
5. F. Pérez-Alfocea, M. Ghanem, A. Gómez-Cadenas, & I. Dodd, “Omics of root-to-shoot signaling under salt stress and water deficit”, OMICS J. Integr. Biol., Vol. 15, 12, 2011, pp. 893–901.
6. J. Hopmans, A. S. Qureshi, I. Kisekka, R. Munns, S. R. Grattan, P. Rengasamy, A.Ben-Gal, S. Assouline, M. Javaux, P.S Mis, PAC, Raats, T.H Skaggs, G. Wang, Q. De Jong Vam Lier, H. Jiao, R.S Lavado, N. Lazarovitch, B, Li, & E. Taleisnik, “Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity”, Adv. Agron., Vol. 169, 2021, pp.1–191.
7. K. Ruiz-Carrasco, F. Antognoni, A. Coulibaly, S.Lizardi, A. Covarrubias, E. Martínez, M. Molina, & S. Biondi, “Variation in salinity tolerance of four lowland genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as assessed by growth, physiological traits, and sodium transporter gene expresión”, Plant Physiol. Biochem., Vol. 49, 2011, pp.1333–1341.
8. M. Sánchez-Bermúdez, J. Del Pozo, & M. Pernas, “Effects of combined abiotic stresses related to climate change on root growth in crops”, Front. Plant Sci., Vol. 13, 918537, 2022.
9. O. Askari-Khorasgani, M. Rehmani, S. H. Wani, & A. Kumar, “Osmotic Stress”, Handb. Plant Crop Physiol., 2021, pp. 445–455.

10. P. Shrivastava & R. Kumar, “Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation”, Saudi J. Biol. Sci., Vol. 22, 2015, pp.123-31.
11. R. Asghari & R. Ahmadvand, “Salinity stress and its impact on morpho physiological characteristics of *Aloe vera*”, Pertanika J. Trop. Agric. Sci., Vol. 41, 2018, pp. 411-422.
12. R. Mukhopadhyay, B. Sarkar, J. Hanuman, S. Parbodh, & B. Nanthi, “Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security”, J. Environ. Manage. Vol. 280, 111736, 2021.
13. R. Munns, J. Passioura, T.Colmer, & C.Byrt, “Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil”, New Phytol., Vol. 225, 2020, pp.1091–1096.
14. SAS. Institute. Base *SAS 9.4.* Procedures Guide:Stastical Procedures, version 9.4; SAS Institute: Cary, NC, USA, 2016.
15. X. Meng, J. Zhou, N. Sui, “Mechanisms of salt tolerance in halophytes: Current understanding and recent advances”, Open Life Sci., Vol. 13, 2018, pp.149–154.
16. Z. Tian, J. Wang, J. Li, & B. Han, “Designing future crops: challenges and strategies for sustainable agriculture”. Plant J., Vol. 105, 2022, pp.1165–1178.

DESARROLLO DE UN NANOMATERIAL BASADO EN ÓXIDO DE GRAFENO Y NUTRIENTES ESENCIALES (N, P, K) Y SU EFECTO EN LA GERMINACIÓN Y EL CRECIMIENTO INICIAL DEL JITOMATE

Omar Augusto Sánchez Ortiz[1], Verónica Janette Cedeño Garcidueñas, Carmen Guadalupe De Jesús Sánchez, Santiago Rangel Vargas, Mario Mendoza Anguiano, Alberto Millán Montañez, Bricia Elena Corona Pacheco

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle de Morelia
omar.so@vmorelia.tecnm.mx

RESUMEN

El uso convencional de fertilizantes químicos genera pérdidas de nutrientes, reduciendo su biodisponibilidad y aumentando el impacto ambiental. En este contexto, los fertilizantes basados en nanomateriales surgen como una alternativa prometedora. El Óxido de Grafeno (OG) destaca por su alta área superficial y abundancia de grupos funcionales oxigenados, lo que le confiere una elevada capacidad de adsorción iónica para actuar como matriz portadora. El objetivo de este trabajo fue sintetizar y caracterizar un nanomaterial de OG impurificado con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) para aplicaciones de liberación controlada de nutrientes. La síntesis se realizó utilizando etilendiamina, fosfato de calcio y nitrato de potasio como precursores de N, P y K, respectivamente. La incorporación de N y P se llevó a cabo mediante un método hidrotermal a 200 °C durante 12 h, previa dispersión ultrasónica. Por su parte, la incorporación de K se efectuó mediante tratamiento por ultrasonido durante 2 h seguido de un proceso de secado a 100 °C. Para la evaluación biológica, se trataron semillas de jitomate con suspensiones del material OG-NPK en dos concentraciones (0.0001 g y 0.001 g en 200 mL). Las pruebas de germinación se realizaron en dos medios: algodón y una mezcla de sustrato comercial (peat moss, vermiculita y agrolita). Se realizaron observaciones diarias durante los primeros 14 días para evaluar el porcentaje de germinación, mientras que también se realizaron mediciones durante los primeros 23 días para registrar variables de altura y observaciones de las hojas. También se realizó una medición del tamaño de raíz al termino de los 23 días para generar una comparativa. Los resultados preliminares indican diferencias significativas en el porcentaje de germinación con respecto al blanco, los resultados de la medición de altura de las plantas muestran un mayor desarrollo en plantas con presencia de OG-NPK, teniendo una diferencia poco significativa entre las concentraciones propuestas. Con ello se puede decir que este nanomaterial representa una alternativa tecnológica viable para optimizar la eficiencia nutricional y avanzar hacia una agricultura más sostenible.

INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica a nivel mundial. México se posiciona como el principal exportador global, contribuyendo con aproximadamente el 30% del mercado internacional [1], lo que convierte a este cultivo en un sector estratégico para la economía nacional. Sin embargo, el crecimiento poblacional proyecta un aumento en

la demanda mundial de jitomate de 8.92 a 11.78 millones de toneladas métricas (MMt) para el año 2030, representando un incremento acumulado del 32.10% [2], lo que impone una presión significativa sobre los sistemas de producción agrícola del país

La expansión de la demanda alimentaria mundial contrasta con la creciente degradación de los recursos edáficos tanto a nivel global como nacional. Según estimaciones del Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD), aproximadamente 35 millones de km² equivalentes al 24% de la superficie terrestre han experimentado algún grado de degradación producto de actividades antropogénicas, con pérdidas en productividad agrícola valuadas en alrededor de $300,000 usd millones anuales [3]. Adicionalmente, se estima que al menos el 40% del suelo destinado a la

producción agrícola a nivel global se encuentra en alguna etapa de degradación, siendo los suelos actualmente perdidos a una tasa de 10 a 40 veces superior a la velocidad de su formación natural [3]. En México, esta problemática se refleja en que el 16% de las tierras agrícolas de temporal presentan erosión hídrica en diferentes grados, distribuidas en al menos 27 estados del territorio nacional, con mayor concentración en Jalisco, Oaxaca, Michoacán y Chihuahua [4]. La degradación edáfica reduce la capacidad de retención de agua y disponibilidad de nutrientes en el suelo, disminuyendo la productividad de los cultivos hasta en un 50% en casos severos [3], comprometiendo directamente la viabilidad de la producción hortícola en México, entre la que destaca el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum L.)* como sector estratégico de la economía nacional.

El uso intensivo de fertilizantes químicos convencionales, aunque ha permitido sostener los niveles de producción requeridos, presenta importantes limitaciones en términos de eficiencia. Se estima que menos del 50% del nitrógeno, el 20% del fósforo y el 40% del potasio aplicados al suelo son efectivamente asimilados por las plantas, perdiéndose el resto por lixiviación, volatilización y fijación en el suelo [5]. El bajo aprovechamiento no solo representa un costo económico significativo para los productores quienes en un 92.5% reportan severas dificultades para adquirir estos insumos [6], sino que genera impactos ambientales negativos acumulativos como la eutrofización de cuerpos de agua y la emisión de gases de efecto invernadero [7, 8].

En este contexto, la nanotecnología emerge como una alternativa tecnológica prometedora para optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes en la agricultura. Los sistemas de liberación controlada de nutrientes basados en nanomateriales permiten una entrega gradual y dirigida de los elementos esenciales, reduciendo las pérdidas por lixiviación y mejorando la biodisponibilidad para las plantas [9]. Diversos estudios han reportado efectos positivos de nanopartículas sobre la germinación, el desarrollo radicular y el crecimiento vegetal en cultivos de importancia agrícola [10].

Entre los nanomateriales con mayor potencial para aplicaciones agrícolas, el óxido de grafeno (OG) destaca por su elevada área superficial específica, su química superficial derivada de la presencia de grupos funcionales oxigenados (carboxilo, epóxido, hidroxilo) y su capacidad de adsorción iónica [11]. Estas propiedades lo convierten en una plataforma ideal para la impurificación con nutrientes esenciales y el diseño de sistemas de fertilización de liberación controlada. Estudios previos han reportado que el OG y sus derivados pueden estimular la germinación y el crecimiento de diversas especies vegetales, modulando procesos fisiológicos como la absorción de agua, la actividad enzimática y los mecanismos de adaptación ante el estrés abiótico [12].

Sin embargo, la información disponible sobre la impurificación del OG con los tres macronutrientes primarios (N, P y K) y su evaluación en sistemas agrícolas reales es aún limitada. Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo sintetizar y caracterizar un nanomaterial de óxido de grafeno impurificado con nitrógeno, fósforo y potasio (OG-NPK), y evaluar su efecto sobre el porcentaje de germinación y el crecimiento inicial de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) Obteniendo resultados cualitativos y cuantitativos de su germinación y crecimiento en sus primeros 23 días de desarrollo.

TEORÍA

Estructura y propiedades del óxido de grafeno

El óxido de grafeno (OG) es un material bidimensional obtenido mediante oxidación química del grafito. Su estructura consiste en láminas de carbono dispuestas en una red hexagonal impurificada con grupos oxigenados, principalmente hidroxilos, epóxidos, carbonilos y carboxilos. La presencia de estos grupos modifica sustancialmente las propiedades fisicoquímicas del material, incrementando su hidrofilicidad y facilitando su dispersión en medios acuosos. Además, dichos grupos actúan como sitios activos para la adsorción de moléculas orgánicas, iones minerales y compuestos bioactivos [11]. Una característica distintiva del OG es su elevada área superficial específica, la cual, en función del método de síntesis y del grado de oxidación, puede generar una

amplia superficie. Esta propiedad favorece una alta capacidad de retención de especies iónicas y posibilita el diseño de sistemas de liberación controlada con eficiencia mejorada [11]. Asimismo, la arquitectura laminar del OG promueve interacciones con soluciones nutritivas mediante mecanismos de intercambio iónico y adsorción-desorción, procesos clave para su aplicación en sistemas agrícolas de precisión.

Impurificación con macronutrientes (N, P, K)

La impurificación del OG con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) implica la incorporación de estos elementos en la superficie o en los espacios interlaminares del nanomaterial mediante adsorción física, interacciones electrostáticas o enlaces de coordinación [9]. Los grupos funcionales oxigenados del OG actúan como centros de anclaje para especies iónicas derivadas de fuentes fertilizantes convencionales, dando lugar a un nanocompuesto (OG-NPK) con capacidad de almacenamiento y liberación modulada.

El nitrógeno es esencial para la síntesis de aminoácidos, proteínas, clorofila y ácidos nucleicos, y su disponibilidad en etapas tempranas del desarrollo vegetal estimula la formación de tejido nuevo y la acumulación de biomasa. No obstante, en sistemas tradicionales, su eficiencia de uso es limitada debido a pérdidas por volatilización y lixiviación, lo que genera costos económicos elevados y reduce la disponibilidad efectiva para los cultivos [5, 6]. La retención de N en matrices de OG podría mitigar estas pérdidas mediante una liberación gradual.

El fósforo participa en la transferencia de energía (ATP), la división celular y la síntesis de ácidos nucleicos. Su biodisponibilidad en suelos suele verse comprometida por procesos de fijación con cationes como Ca^{2+}, Fe^{3+} y Al^{3+} [5]. La adsorción de P sobre OG podría reducir dicha inmovilización, manteniendo el nutriente en formas más accesibles para la rizósfera.

Por su parte, el potasio regula el potencial osmótico, la apertura estomática y la activación enzimática, contribuyendo a la tolerancia frente a estrés hídrico y salino [12]. Su incorporación en sistemas basados en OG permitiría un suministro sostenido, alineado con la demanda fisiológica del cultivo.

Mecanismos de liberación controlada

A diferencia de los fertilizantes convencionales, que liberan nutrientes de forma inmediata tras su aplicación, los nanocompuestos OG-NPK operan mediante mecanismos de liberación modulada, gobernados por difusión, intercambio iónico y desorción superficial dependiente del entorno [9]. La cinética de liberación está influenciada por variables edáficas y climáticas, como humedad, temperatura, pH y actividad microbiana, así como por las características estructurales del nanomaterial (grado de oxidación, tamaño de lámina y densidad de grupos funcionales). Esta respuesta ambiental permite sincronizar la disponibilidad nutrimental con las etapas fenológicas críticas del cultivo, optimizando la eficiencia de uso y reduciendo la frecuencia de aplicaciones.

Brecha de conocimiento y justificación del estudio

A pesar de la evidencia acumulada sobre las propiedades del OG y su potencial como vector de nutrientes, existen limitaciones en la comprensión de los mecanismos de interacción OG-NPK en condiciones de campo, así como en la estandarización de protocolos de funcionalización que garanticen estabilidad coloidal, biocompatibilidad y escalabilidad. Además, pocos estudios han evaluado de manera integral el efecto de estos nanocompuestos sobre la germinación, el desarrollo radicular y la eficiencia nutrimental en etapas tempranas bajo condiciones de estrés hídrico. Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del óxido de grafeno, impurificado con nutrientes esenciales sobre la germinación y crecimiento inicial de plantas de jitomate, con el fin de contribuir al desarrollo de alternativas tecnológicas que optimicen el establecimiento de cultivos y promuevan prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes en el uso de recursos.

PARTE EXPERIMENTAL

Se comenzó con la síntesis del óxido de grafeno (OG) mediante el método de Hummers modificado. Se agregaron 3 g de grafito en 70 mL de H2SO4 al 98%, posteriormente se agregan 9 g de KMnO4 sin que la mezcla sobrepase los 20 °C y se agita durante 10 minutos a 200 rpm. Posteriormente, la mezcla se coloca en baño de aceite durante 30 minutos a 40 °C. A continuación, se añaden 150 mL de agua y se agita durante 15 minutos a 95 °C. Posteriormente se agregan 500 mL de agua lentamente y 15 mL de H2O2 al 30% y se agita durante 10 min. Finalmente se neutraliza adicionando una solución 250 mL de HCl al 10%, se lava con agua hasta obtener un pH neutro y seca a 90 °C durante 24 h.

Posteriormente, se establece una relación estequiométrica equivalente NPK 10–5–5 (%p/p), seleccionada por su potencial aplicación durante las etapas tempranas del desarrollo vegetal. Como fuente precursora de Nitrógeno se usó urea [$CO(NH_2)_2$], para el fósforo, fosfato monoamónico ($NH_4H_2PO_4$) y Potasio, nitrato de potasio (KNO_3).

La impurificación del óxido de grafeno con nitrógeno y fósforo se realizó mediante un tratamiento hidrotermal utilizando urea y fosfato monoamónico como fuentes precursoras de ambos elementos. Inicialmente, 5.0 g de óxido de grafeno fueron dispersados en 100 mL de agua desionizada mediante agitación mecánica y sonicación durante 30 min para obtener una suspensión homogénea. Posteriormente, se incorporaron 1.65 g de urea y 1.85 g de fosfato monoamónico, manteniendo la mezcla bajo agitación constante hasta lograr la completa dispersión de los reactivos. La suspensión fue transferida a un reactor hidrotermal con recubrimiento interno de teflón y sometida a tratamiento térmico a 200 °C durante 12 h. Después se lava con agua desionizada y seca a 60 °C.

La incorporación de potasio se realizó mediante un proceso de adsorción superficial sobre el material previamente impurificado con nitrógeno y fósforo. Para ello, se preparó una solución acuosa conteniendo 1.30 g de nitrato de potasio disueltos en 100 mL de agua desionizada. Posteriormente, el material OG–NP fue añadido a la solución y bajo agitación continua durante 24 h a temperatura ambiente para favorecer la interacción de los iones potasio con los grupos funcionales presentes en la superficie del nanomaterial. Finalizado el periodo de contacto, el material fue recuperado, lavado y secado a 60 °C. El producto obtenido correspondió al óxido de grafeno impurificado con nitrógeno, fósforo y potasio (OG–NPK).

Por otro lado, las semillas de jitomate fueron seleccionadas y sometidas a un proceso de impregnación utilizando ultrasonido durante 15 minutos con proporciones de 0.001,0.0001g de OG y un fertilizante convencional, después se realizó la germinación bajo condiciones controladas. El experimento conformado por ocho tratamientos y un blanco, con tres repeticiones por tratamiento en algodón y Peat Moss, con agrolita y vermiculita. En total se evaluaron 580 semillas de jitomate.

Durante un periodo de 23 días se registraron variables relacionadas con el porcentaje de germinación, altura de planta, supervivencia. Los resultados obtenidos fueron comparados con el tratamiento en blanco para determinar la efectividad del nanomaterial desarrollado.

RESULTADOS

Después de 10 días de evaluación se observó que los tratamientos basados en óxido de grafeno favorecieron el proceso de germinación en comparación con el blanco, disminuyendo el tiempo requerido para la germinación de las plántulas. Alcanzando un éxito de germinación del 95 % mientras que el blanco se mantuvo por debajo de 80 % al igual que el fertilizante comercial.

Los tratamientos, blanco y comerciales tuvieron sus primeras germinaciones en los días 5 a 7 mientras que los tratamientos de OG y OG-NPK tuvieron germinación en los días 3 y 5.

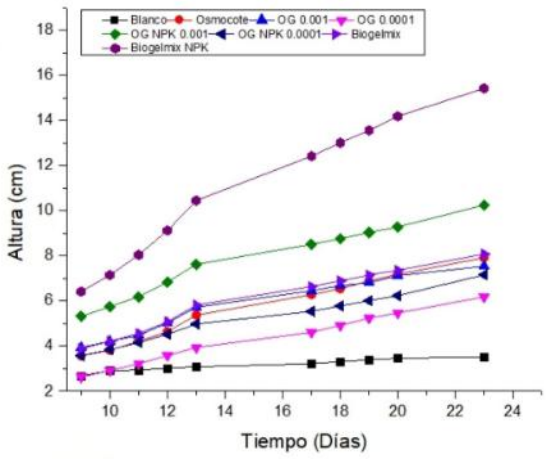
El monitoreo se llevó a cabo durante 23 días en los cuales se midió la altura (Figura 1), vigilando la aparición de patógenos, durante el monitoreo se observó afectación en las plantaciones de blanco con perdida por aparición de *Damping off* en sus primeros días de germinación, teniendo pérdidas de hasta el 50 % en la germinación. En el tratamiento comercial también se tuvo presencia del *Damping Off*, sin embargo, la pérdida disminuyó a un 25% en la germinación. En los tratamientos con OG se tuvo una mortalidad del 10% mientras que los tratamientos de OG-NPK se mantuvieron sin presencia del *Damping Off*. Estos resultados demostraron supervivencia del 88%.

Al terminar los 23 días de monitoreo, el tratamiento OG-NPK presentó los mejores resultados (Figura 1). Se registró un incremento superior al 30% en el porcentaje de germinación respecto al tratamiento convencional. Así mismo, las plantas tratadas con OG-NPK alcanzaron una altura promedio cercana a los 15 cm, mientras que los demás tratamientos presentaron alturas promedio entre 10 y 12 cm.

El índice de supervivencia fue superior al 20% respecto al blanco. Además, se observó un mayor desarrollo radicular en los tratamientos con OG y OG-NPK, caracterizado por la presencia de raíces secundarias y un incremento en el tamaño de la raíz, lo que sugiere una mayor capacidad para la absorción de agua y nutrientes. Estos resultados demuestran que la funcionalización del óxido de grafeno con nutrientes esenciales favorece el establecimiento temprano de las plántulas y mejora el crecimiento inicial del cultivo de jitomate.

La Figura 1 (a) denota el crecimiento de la planta en algodón, así como su germinación, en el caso de la Figura 1 (b) se observa la altura y geminación en sustrato, en donde se puede observar que para ambos casos el material OG-NPK tiene un mejor desempeño debido al crecimiento de la planta.

(a)





(b)

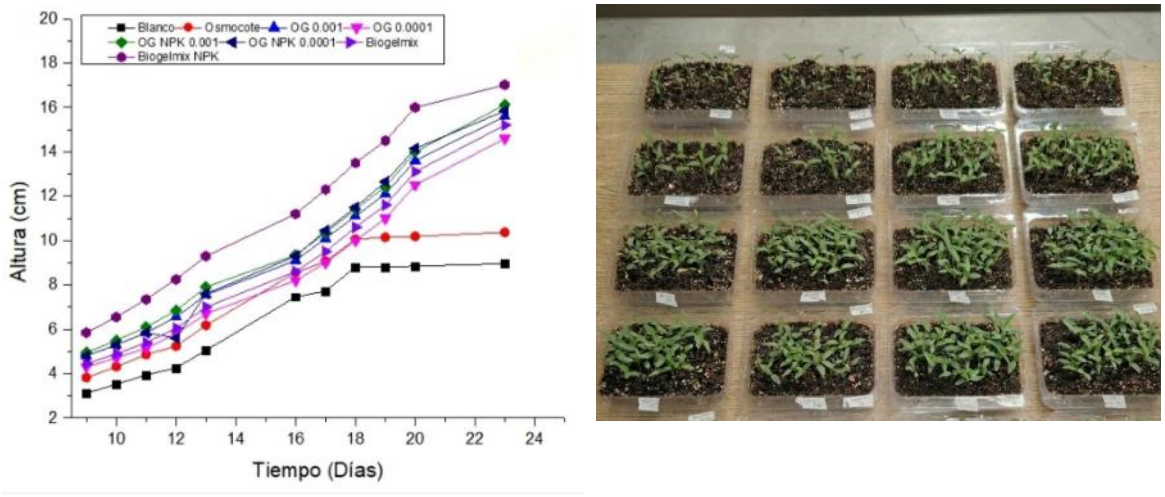


Figura 1. Altura de Planta de jitomate en (a) algodón y (b) sustrato.

CONCLUSIONES

El presente estudio muestra la viabilidad del óxido de grafeno funcionalizado con nitrógeno, fósforo y potasio (OG-NPK) como sistema de liberación controlada para el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*). Los resultados indican que la aplicación del nanocompuesto favoreció significativamente la germinación, el desarrollo del sistema radicular y la biomasa inicial en comparación con los tratamientos convencionales. Este desempeño se atribuye a la capacidad del material para adsorber nutrientes en su estructura laminar y liberarlos gradualmente en la rizósfera, sincronizando la disponibilidad nutrimental con la demanda fisiológica de la plántula.

La implementación de nanofertilizantes basados en OG-NPK representa una estrategia tecnológica con potencial para incrementar la eficiencia de uso de nutrientes y reducir las pérdidas por lixiviación en etapas críticas de establecimiento. No obstante, se recomienda continuar con investigaciones que evalúen el impacto ambiental a largo plazo y la escalabilidad de la síntesis del material, con el fin de consolidar su integración en sistemas de producción agrícola sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

1. Evans, A. G. (1990). Perspective on the development of high-toughness ceramics. Journal of the American Ceramic Society, 73(2), 187–206. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06526.x
2. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Avance de la producción agropecuaria: Cierre de la producción agrícola 2023. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado el 5 de junio de 2026, de https://www.gob.mx/siap
3. Hossain, A., Krupnik, T. J., Timsina, J., Mahboob, M. G., Chaki, A. K., Farooq, M., Bhatt, R., Fahad, S., & Hasanuzzaman, M. (2020). Agricultural land degradation: Processes and problems undermining future food security. In M. Hasanuzzaman, M. A. Nahar, & M. Öztürk (Eds.), Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth (pp. 17–65). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_2
4. Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. Investigaciones Geográficas, (101), Artículo e59976. https://doi.org/10.14350/rig.59976
5. Baligar, V. C., Fageria, N. K., & He, Z. L. (2001). Nutrient use efficiency in crops. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 32(7-8), 921–950. https://doi.org/10.1081/CSS-100104098

6. Vicente Solano, S. V., & Calle Arancibia, M. E. (2024). Fertilizantes en la producción agrícola: Un análisis de la percepción de uso. Revista NombreDeLaRevista, Volumen(Número), Páginas.
7. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2019: Proteger la biodiversidad agrícola para la seguridad alimentaria. FAO. https://doi.org/10.4060/ca3129es
8. Trenkel, M. E. (2010). Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture (2.ª ed.). International Fertilizer Industry Association (IFA).
9. Jogaiah, S., Singh, H. B., Fraceto, L. F., & de Lima, R. (Eds.). (2021). Advances in nano-fertilizers and nano-pesticides in agriculture: A smart delivery system for crop improvement. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/C2019-0-01538-3
10. Nair R, Mohamed MS, Gao W, Maekawa T, Yoshida Y, Ajayan PM, Kumar DS. Effect of carbon nanomaterials on the germination and growth of rice plants. J Nanosci Nanotechnol. 2012 Mar;12(3):2212-20. doi: 10.1166/jnn.2012.5775. PMID: 22755040.
11. Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. Chemical Society Reviews, 39(1), 228–240. https://doi.org/10.1039/B917117M
12. Shayista, H., Niranjan Raj, S., Anjani, S., Manju, K., Ravikumara, T. K., Pavan, T. K., & Baker, S. (2025). Nanobiotechnology for abiotic stress adaptation and mitigation in agricultural crops. In Smart Nanomaterials Technology (Vol. 373, pp. 295–320). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-9298-9_15

RESPUESTA VARIETAL DE CAÑA DE AZÚCAR A LA MULTIPLICACIÓN *IN VITRO* PARA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS

Eucario Mancilla-Álvarez[1]; Jericó Jabín Bello-Bello[2]; María Angélica Fuentes-Torres[1]; Tsujmejy Gómez-Navor[3]; Fernando Carlos Gómez-Merino[3]*

[1]Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. [2]SECIHTI-Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. [3]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo,
fernandg@colpos.mx

RESUMEN

La técnica de cultivo de tejidos vegetales es una alternativa eficiente para la micropropagación, que permite producir plantas rejuvenecidas y libres de plagas y enfermedades en espacios reducidos bajo un ambiente aséptico. Esta técnica ha comprobado ser una herramienta eficiente para la micropropagación de diferentes variedades de caña de azúcar. El objetivo del estudio fue evaluar la respuesta de 10 diferentes variedades de caña (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, y Mex 09-341) a la multiplicación in vitro en un medio de cultivo semisólido. Para el establecimiento in vitro se extrajeron los ápices de caña de azúcar de 30 cm de longitud del banco de germoplasma del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, con 10 meses de edad. Se mantuvieron en refrigeración y posteriormente se redujeron a 10 cm de longitud, sometiéndolos a un tratamiento de hidrotermoterapia. Completado este proceso, los ápices se redujeron finalmente a 3 cm. Estos se utilizaron como explantes y colocaron individualmente en tubos de ensayo con 15 mL de medio MS. Los explantes se incubaron a 24 ± 2 °C, con una densidad de flujo fotónico fotosintético (PPFD) de 29 ± 5 µmol m^{-2} s^{-1} y un fotoperiodo de 16 h luz. En la etapa de multiplicación se utilizaron brotes de 2 cm de longitud cultivados en medio MS, las condiciones de manejo fueron las misma que las descritas para el establecimiento in vitro. Después de cuatro semanas, se evaluó el número de brotes por explante. Se empleo un diseño completamente al azar con triplicado. El mayor número de brotes por explante se observó en las variedades Mex 09-333 y Mex-312, seguidos por la variedad Mex 09-290 y Mex 09-132. Las variedades que presentaron el menor número de brotes fueron Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-321, Mex 09-341, Mex 09-66 y Mex 09-93. En conclusión, las variedades de caña de azúcar propagadas presentaron diferente emisión de brotes en condiciones in vitro; las variedades con menor número de explantes requieren de ajustes en la combinación y/o concentración de reguladores de crecimiento, para tener una mejor respuesta.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor importancia en el mundo. En México para el año 2024, la actividad cañera aportó el 5.9% del valor de la producción agrícola nacional, consolidándose como el tercer cultivo de mayor importancia entre los cultivos cíclicos y perennes. Se cultiva en 15 estados de la república, siendo Veracruz el de mayor importancia al concentrar el 42.7% de la superficie cosechada. (FIRA, 2025).

Por su importancia, la caña es un recurso genético de alto valor comercial. Actualmente, este cultivo enfrenta diversas problemáticas derivadas de la falta de innovaciones tecnológicas y del uso de variedades mejoradas adaptadas a las regiones productoras (Rangel-Estrada *et al.,* 2016). Asimismo, su método de propagación convencional por medio del empleo de yemas representa una limitante importante, ya que puede favorecer la dispersión de plagas y enfermedades (Singh y Chokheli, 2025). En este sentido, la implementación de la biotecnología y la aplicación de técnicas de cultivo *in vitro* permiten introducir plántulas rejuvenecidas, con pureza genética y calidad fitosanitaria, en espacios reducidos y bajo condiciones asépticas, asegurando un mayor amacollamiento en campo en comparación con los métodos convencionales de propagación (Bello-Bello *et al*., 2020; Castañeda-Castro *et al*., 2014).

Ante la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de producción de caña de azúcar, resulta indispensable la implementación de estrategias de innovación para lograr avances que impacten positivamente en la producción y permitan obtener material vegetal de calidad. El cultivo *in vitro* se sitúa como una de las mejores alternativas por sus múltiples beneficios (Castañeda-Castro *et al.*, 2014). Sin embargo, la respuesta a la multiplicación *in vitro* puede variar entre genotipos debido a diferencias fisiológicas, bioquímicas y genéticas que influyen en variables relacionadas con la generación de brotes (Basnayake *et al*., 2011; García-Merino et al., 2023; Neves et al., 2003). Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de 10 variedades de caña de azúcar (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, y Mex 09-341) a la multiplicación *in vitro* en relación con el número de brotes por explante.

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal

Se utilizaron 10 variedades vegetales de caña de azúcar (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, y Mex 09-341. El material fue recolectado del banco de germoplasma del Colegio de Postgraduados, ubicado en el Campus Cordoba en Amatlán de Los Reyes, Veracruz. Se realizó la extracción de ápices de 30 cm de longitud, manteniéndolos en condiciones de refrigeración para una posterior reducción hasta 3 cm, manteniendo condiciones asépticas. Los ápices obtenidos se utilizaron como explantes y se colocaron individualmente en tubos de ensayo con 15 mL de medio MS (Murashige y Skoog, 1962) suplementado con sacarosa; el pH del medio se ajustó a 5.8 y se añadió un gelificante. Los explantes se incubaron a 24 ± 2 °C, con una densidad de flujo fotónico fotosintético (PPFD) de 29 ± 5 µmol m^{-2} s^{-1} y un fotoperiodo de 16 h de luz. En la fase de multiplicación *in vitro*, se utilizaron brotes de 2 cm de longitud cultivados en medio MS. Se aplicó una suplementación con base en lo descrito por Martínez-Estrada et al. (2017). Las condiciones de manejo de los explantes fueron las mismas que se describieron para la fase de establecimiento.

Evaluación de variables

Las evaluaciones se llevaron a cabo después de cuatro semanas de cultivo en la fase de multiplicación. Se evaluó el número de brotes por explante mediante conteo directo.

Diseño experimental y análisis de datos

Se siguió un diseño completamente al azar con tres repeticiones y se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

RESULTADOS

Las variedades Mex 09-132, Mex 09-290, Mex 09-312 y Mex 09-333 presentaron el mayor número de brotes por explante, con 10.50, 10.20, 11.80 y 12.10, respectivamente. Por el contrario, las variedades Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-321 y Mex 09-341, tuvieron el menor número de brotes por explante, con 5.10, 6.20, 6.80 y 7.60, respectivamente. Las variedades Mex 09-66 y Mex 09-93, presentaron valores intermedios de brotes por explante, con 8.10 y 8.50, respectivamente (Figura 1).

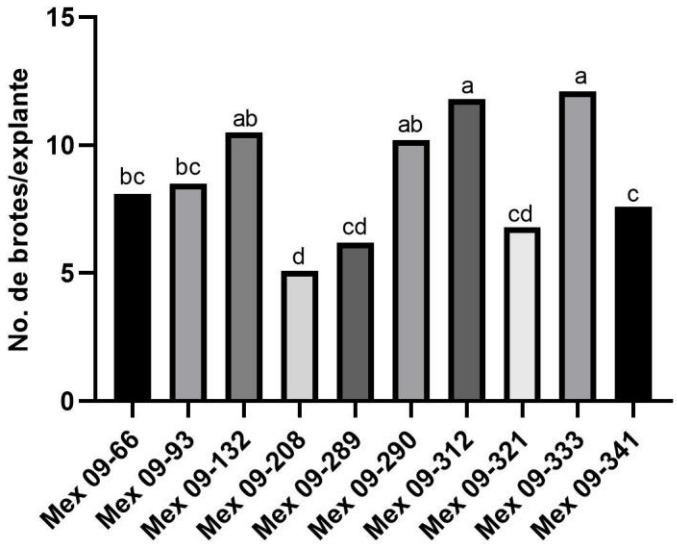


Figura 1. Número de brotes por explante para las diferentes variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). Media ± error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P < 0.05$).

Las diferentes respuestas de cada variedad a la generación de brotes están determinadas por el genotipo y la sensibilidad de este a la aplicación exógena de reguladores de crecimiento, así como a la regulación por efecto de los genes relacionados con la morfogénesis (Basnayake *et al*., 2011). De acuerdo con García-Merino *et al.* (2023) y Neves *et al.* (2003), la proliferación de brotes y la eficiencia de elongación en los genotipos se encuentran influenciadas por factores fisiológicos y bioquímicos.

En el caso de las variedades que presentaron el menor número de brotes, se sugiere realizar ajustes en la concentración y/o mezcla de los reguladores de crecimiento empleados. Se ha reportado un incremento en el número de brotes durante la multiplicación *in vitro* de caña de azúcar cv. CoPb 91, al aplicar bencilaminopurina (BAP), kinetina (KIN) y ácido indolacético (AIA) en concentraciones de 0.5 mg L^{-1} (Kaur y Sandhu, 2015). García-Merino et al. (2024) reportaron en la variedad Mex 69-290, un aumento en la tasa de multiplicación, al realizar aplicaciones de tidiazurón (TDZ) a una concentración de 1 mg L^{-1}. Recientemente, Munoz-Ibarra et al. (2026) reportaron que la aplicación de 5 mg L^{-1} de $La(NO_3)_3$@Zn-MOF aumentó el número de brotes y hojas en las plántulas de caña de azúcar, y se observaron aumentos significativos en materia fresca y seca, aunque se observaron efectos inhibitorios a concentraciones de 10 y 20 mg L^{-1} de $La(NO_3)_3$@Zn-MOF y $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$.

CONCLUSIONES

Las variedades de caña evaluadas presentaron diferencias en su capacidad para la generación de brotes durante la fase de multiplicación *in vitro*. Las variedades con el mayor número de brotes por explante fueron Mex 09-132, Mex 09-290, Mex 09-312 y Mex 09-333. Las variedades Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-321 y Mex 09-341, mostraron la menor capacidad de generación de brotes. Por lo que se sugiere realizar ajustes en las concentraciones y/o mezclas de los reguladores de crecimiento para obtener una mejor respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kaur, J. S. Sandhu, “High throughput in vitro micropropagation of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) from spindle leaf roll segments: Cost analysis for agri-business industry”, Plant Cell Tissue Organ. Cult., Vol. 120, 1, 2015, pp. 339-350.
2. L. Muñoz-Ibarra, J. L. Spinoso-Castillo, D. Padilla-Chacón, X. J. García-Zárate, R. Peña-Rodríguez, M. T. González-Arnao, R. Colorado-Peralta, C. A. Cruz-Cruz, “Influence of the hybrid compound $La(NO_3)_3$@Zn-MOF on the in vitro growth of sugarcane (*Saccharum* spp. L.). *Plants 15*, 2026, 609.
1. G. F. García-Merino, M. A. Ramírez-Mosqueda, N. Aguilar-Rivera, H. P. Medorio-García, G. A. Reyes-Tomas, M. V. Rodríguez-Deméneghi, “Sugarcane morphological responses enhancement via transverse thin cell layer with cytokinin’s and photoperiods treatments”, Braz. J. Bot., Vol. 47, 3, 2024, pp. 577-583.
2. E. Mancilla-Álvarez, M. A. Ramírez-Mosqueda, S. Arano-Avalos, R. Nuñez-Pastrana, J. J. Bello-Bello, “*In vitro* techniques to the conservation and plant regeneration of malanga (*Colocasia esculenta* L. Schott)”, Hort. Sci., Vol. 54, 2, 2019, pp. 514-518.
3. E. Martínez-Estrada, J. H. Caamal-Velázquez, J. Salinas-Ruíz, J. J. Bello-Bello, “Assessment of somaclonal variation during sugarcane micropropagation in temporary immersion bioreactors by intersimple sequence repeat (ISSR) markers”, In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant, Vol. 53, 6, 2017, pp. 553-560.
4. FIRA, “Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura”, “Panorama agroalimentario 2025, Azúcar”. Consultado en línea: https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=133523
5. G. F. García-Merino, M. A. Ramírez-Mosqueda, N. Aguilar-Rivera, H. P. Medorio-García, G. A. Reyes-Tomas, M. V. Rodríguez-Deméneghi, “Sugarcane morphological responses enhancement via transverse thin cell layer with cytokinin’s and photoperiods treatments”, Braz. J. Bot., Vol. 47, 3, 2024, pp. 577-583.
6. J. J. Bello-Bello, J. Zavala-Ruiz, N. Cruz-Huerta, O. Baltazar-Bernal, “*In vitro* germination and development of the trumpetist orchid (*Myrmecophila grandiflora* Lindl.) using ebb-and-flow bioreactor”, Propag. Ornam. Plants, Vol. 20, 3, 2020, pp. 88-95.
7. O. Castañeda-Castro, F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, V. Morales-Ramos, M. T. González-Arnao, Y. M. Martínez-Ocampo, R. Gámez-Pastrana, M. C. Pastelín-Solano, “Aplicaciones del cultivo de tejidos vegetales en caña de azúcar (*Saccharum* spp.)”, Agro Productividad, Vol. 7, 5, 2014, pp. 17-21.
8. R. K. Singh, V. A. Chokheli, “Plant biotechnology: Applications in In Vitro plant conservation and micropropagation”, Horticulturae, Vol. 11, 4, 2025, 358.
9. S. E. Rangel-Estrada, E. Hernández-Meneses, M. Hernández-Arenas, “Micropropagación de variedades de caña de azúcar cultivadas en México”, Rev. Fitotec. Mex., Vol. 39, 3, 2016, pp. 225-231.
10. S. W. V. Basnayake, R. Moyle, R. G. Birch, “Embryogenic callus proliferation and regeneration conditions for genetic transformation of diverse sugarcane cultivars”, Plant Cell Rep., Vol. 30, 3, 2011, pp. 439-448.
11. N. Neves, M. Segura-Nieto, M. A. Blanco, M. Sánchez, A. González, J. L. González, R. Castillo, “Biochemical characterization of embryogenic and non-embryogenic calluses of sugarcane”, In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant, Vol. 39, 3, 2003, pp. 343-345.
12. T. Murashige, F. Skoog, “A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures”, Physiol. Plant., Vol. 15, 3, 1962, pp. 473-497.

CUANTIFICACIÓN DE CAROTENOIDES DE OLEORRESINAS A PARTIR DE LA EXTRACIÓN DE LA FLOR DE CEMPASÚCHIL

Erika Ramos Ojeda, Yuli Yadira Pacheco Nolasco, Christian Oliver Días Ovalle, Fabiola Herrera Enciso

Tecnológico Nacional de México/I. T. Roque
erika.ro@roque.tecnm.mx

RESUMEN

Los carotenoides son compuestos bioactivos que se encuentran en una amplia variedad de seres vivos como plantas, algas, hongos y algunos microorganismos, estos compuestos naturales tienen la propiedad de dar una pigmentación amarilla, naranja o rojiza (Britton,2008). La extracción de carotenoides en la flor de cempasúchil se realizó mediante el uso de etanol como disolvente, los pétalos fueron agregados a un matraz previamente macerados, manteniéndolos en agitación, al tener el analito de interés en el disolvente se forma una oleorresina concentrada realizando una saponificación (hidrólisis), esta reacción rompe los ésteres formados en la extracción obteniendo la luteína de manera libre y purificada aumentando su concentración (Berg et al, 2007). A partir de la luteína se obtiene zeaxantina mediante una isomerización. Se desarrollaron cuatro formulaciones de microencapsulación utilizando carragenina, maltodextrina y almidón como materiales encapsulantes. Estas formulaciones fueron caracterizadas mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), espectrofotometría UV-Vis y pruebas de estabilidad acelerada, evaluando parámetros fisicoquímicos: pH y antioxidantes, factores que influyen en la degradación. La formulación 1 MC 20% con maltodextrina presenta una concentración total de carotenoides de 190 g/kg con 159.958 g/kg de luteína y 23.906 g/kg de zeaxantina; la formulación 2 MC 20% con carrageno presenta concentración total de 254.11 g/kg con 215.815 g/kg de luteína y 28.612 g/kg de zeaxantina, la formulación 3 MC 20% con almidón tuvo una concentración de 229.76 g/kg con 32.396 g/kg de luteína y 184.33 g/kg de zeaxantina y la formulación 4 MC 20% de almidón como encapsulante y recubrimiento tuvo una concentración de 252.01 g/kg del cual 31.929 g/kg de luteína y 209.621 g/kg de zeaxantina. El descenso de la concentración de carotenoides con respecto al tiempo demuestra que la degradación depende de los encapsulantes, ya que estos cumplen una función importante en las microencapsulaciones [2]. Por lo que la formulación 4 tuvo una perdida menor de carotenoides ya que presenta una degradación del 4% en las primeras 72 h de estabilidad acelerada de la muestra. El pH y los antioxidantes no son factores que influyen directamente en la degradación de las microencapsulaciones, ya que las formulaciones propuestas se mantuvieron en rangos dentro de pH ácidos presentando la misma tendencia, de esta manera el factor que influyó en la degradación de los carotenoides fue el encapsulante del almidón quien presentó mejores resultados, debido a que es el encargado de proteger el analito de interés, las microencapsulaciones originales presentaban una degradación mayor al 50% logrando obtener una degradación del 4%.

INTRODUCCIÓN

Los carotenoides pertenecen a la familia de los terpenos debido a que están formados por unidades de isopreno, dividiéndose en carotenos y xantofilas (Rodriguez et al, 2008). Una forma de obtener los carotenoides de la flor de cempasúchil es por extracción sólido-líquido, debido a que los analitos de interés se encuentran en una matriz vegetal. La demanda de los carotenoides naturales ha incrementado considerablemente debido a sus funcionalidades, ya sea como pigmento, antioxidante o precursor de la vitamina A (Berg et al, 2019). Una forma de obtener los carotenoides es a partir de oleorresinas, que son extracciones concentradas hechas con solventes a partir de plantas. Las oleorresinas son mezclas complejas de compuestos lipofílicos presentes en plantas aromáticas o medicinales, como la pimienta, jengibre, cúrcuma, pino, gomas resinosas, etc., estas están compuestas no solo de pigmentos, sino también, aceites y otros compuestos (Nayin et al, 2022).Otra forma de la obtención de los pigmentos es a partir de fermentaciones, usando microorganismos como

levaduras o algas para producir pigmentos bajo condiciones controladas, esta alternativa biotecnológica ha ganado interés por su sustentabilidad y escalabilidad. Sin embargo, extraer y purificar los carotenoides, no es tan sencillo, debido a que son compuestos altamente delicados, por lo que la extracción de los carotenoides implica técnicas que buscan preservar la integridad de los compuestos frente a la luz, el oxígeno y la temperatura (Nayin et al, 2022). Métodos como la extracción con solventes, la extracción asistida por ultrasonido o la extracción con fluidos supercríticos son comúnmente utilizados en la industria. Aunque, la elección del método depende del tipo de materia prima, la eficiencia deseada y la posterior purificación de la extracción. Así mismo, la extracción con algún solvente orgánico se emplea principalmente cuando el compuesto de interés se encuentra en la matriz de manera sólida(Dean,2007). Por lo que, al tener la extracción del analito la purificación implica la eliminación de las impurezas que se encuentran en la oleorresina que se extrajo, y logrando la concentración de los carotenoides. Las microencapsulaciones permiten resolver problemas de la industria de alimentos ya que controla la eliminación de saborizantes, la degradación de aditivos, reduciendo considerablemente la volatilidad, higroscopicidad y reactividad logrando la estabilidad del producto (Huerta, 2010).

Por lo que la presente investigación se encarga de extraer y purificar carotenoides para posteriormente realizar una microencapsulación como medio para reducir la degradación

METODOLOGÍA

Para la extracción de los carotenoides de la flor de cempasúchil se empleó el uso de un disolvente orgánico en este caso se empleó de etanol, con el fin de transferir el analito de interés al disolvente. Previamente a la extracción, se realizó un pre-tratamiento a los pétalos de la flor de cempasúchil, estos fueron previamente secados, para posteriormente ser triturados, al tener los pétalos ya tratados como anteriormente mencionado se introducen a un matraz con el solvente, este debe de cubrirlos completamente manteniendo una agitación para lograr la extracción del analito. Al tener el analito en el disolvente se forma una oleorresina, esta oleorresina contiene carotenoides esterificados con ácidos grasos dando un rendimiento alto de concentración de carotenoides. Esta oleorresina es saponificada (hidrolisis de esteres en un medio alcalino), este proceso químico rompe los esteres de ácidos grasos y pigmentos presentes en el extracto utilizando un álcali como NaOH o KOH, con el fin de transformar los compuestos de esteres en su forma libre, es decir, la estructura de manera más simple, en esta reacción se libera la luteína y zeaxantina. La luteína ya de manera libre, se inicia su purificación empleando otro disolvente para la eliminación de impurezas, este proceso de purificación de realiza relación 1:1 mezclando la luteína o con el etanol por medio de agitación para posteriormente ser centrifugada, esta etapa de purificación se realiza dependiendo a la concentración de carotenoides totales que se tienen tener. Además, de la luteína que se obtiene por medio de la saponificación se puede obtener zeaxantina mediante una isomerización, la obtención de este carotenoide se hace mediante el uso de un álcali, calor y un catalizador; esto logra químicamente la posición de un doble enlace en uno de los anillos externos de la estructura de la luteína, transformándola en zeaxantina.

Estos dos carotenoides se emplearon para la elaboración de microencapsulaciones. En esta investigación se desarrollaron cuatro formulaciones de microencapsulación utilizando carragenina, maltodextrina y almidón como materiales encapsulantes con el propósito de proteger o recubrir el carotenoide de la degradación a los factores que están expuestos como la luz, la temperatura, humedad, oxigeno, etc. Estas formulaciones fueron caracterizadas mediante cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC), espectrofotometría UV-Vis y pruebas de estabilidad acelerada, además se evaluaron parámetros fisicoquímicos como el pH y la capacidad antioxidante, con el fin de determinar su influencia en la conservación de los carotenoides, debido a que son factores que influyen en su degradación.

RESULTADOS

Se evaluaron cuatro formulaciones distintas de microencapsulación destinadas a la incorporación de luteína y zeaxantina, los encapsulantes utilizados fueron el carrageno, la maltodextrina y el almidón, estas formulaciones se analizaron por medio de HPLC, UV-Vis y estabilidad acelerada, además de otros parámetros como pH y antioxidantes. En la tabla 1 se muestran las formulaciones propuestas con los insumos utilizados.

Tabla 1. Formulaciones de Microencapsulación MC 20%.

Formulación			
1	2	3	4
Insumos	Insumos	Insumos	Insumos
Proteína	Proteína	Proteína	Almidón 1
Goma	Goma	Goma	Goma
Ácido 1	Ácido 1	Ácido 1	Ácido 1
Ácido 2	Ácido 2	Ácido 2	Ácido 2
Maltodextrina	Carrageno	Almidón 1	Almidón 2
Habo	Habo	Habo	Habo
Natamicina	Natamicina	Natamicina	Natamicina
Tween	Tween	Tween	Tween
Tocoferol	Tocoferol	Tocoferol	Tocoferol
EDTA	EDTA	EDTA	EDTA
Pasta	Pasta	Pasta	Pasta

El análisis de las microencapsulaciones por medio de HPLC y UV-Vis muestra la concentración total de carotenoides presentes en las formulaciones, esta concentración se obtiene al realizar una lectura en el UV-Vis donde la absorbancia que se arroja es por medio de la longitud de onda (446 nm) a la que se mide las microencapsulaciones, la ecuación 1 y 2 determina la determinación de luteína y zeaxantina obtenida. La tabla 2 muestra los valores calculados.

$$Luteína\,\frac{g}{kg} = CT\ inicial * \%\ Luteína \qquad (1)$$

$$Zeaxantina\,\frac{g}{kg} = CT\ inicial * \%\ Zeaxantina \qquad (2)$$

Tabla 2. Concentración de carotenoides totales en g/Kg.

	Análisis		
	Formulación MC 20%VPP-Maltodextrina		
UV-Vis	CT	190.95	
HPLC	% Luteina	83.77	159.958815
	% Zeaxantina	12.52	23.90694
	Formulación MC 20%VPP-Carrageno		
UV-Vis	CT	254.11	
HPLC	% Luteina	84.93	215.815623
	% Zeaxantina	11.26	28.612786
	Formulación MC 20%VPP-Almidón 1V		
UV-Vis	CT	229.76	
HPLC	% Luteina	14.1	32.39616
	% Zeaxantina	80.23	184.336448
	Formulación MC 20%VPP-Almidón 2V		
UV-Vis	CT	252.01	
HPLC	% Luteina	12.67	31.929667
	% Zeaxantina	83.18	209.621918

Los cromatogramas de las figuras 1, 2 y 3 muestran los resultados del análisis por HPLC. Las condiciones operacionales se mantuvieron constantes: un flujo de 1 mL/min, un volumen de inyección de 5 µL, una temperatura de columna de 25 °C y el uso de una fase móvil de arrastre. La única variable modificada fue el tipo de recubrimiento de la columna. En los perfiles obtenidos se observa que el tiempo de retención varía según el recubrimiento, con corridas que oscilan entre los 6 y 12 minutos. La cuantificación de los carotenoides se realizó mediante la integración del área bajo la curva. Los picos mayoritarios corresponden a los analitos de interés, luteína y zeaxantina. Por el contrario, las señales de menor intensidad indican la presencia de otros carotenoides minoritarios en las formulaciones, o bien, en algunos casos se pueden identificar como degradación, contaminación o de analitos de menor interes.

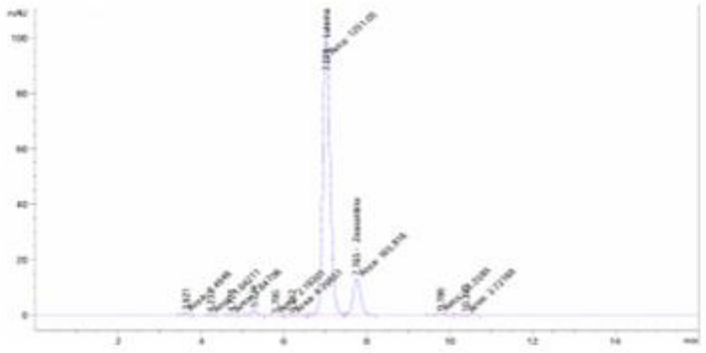


Figura 1. Cromatograma MC 20%-Maltodextrina.

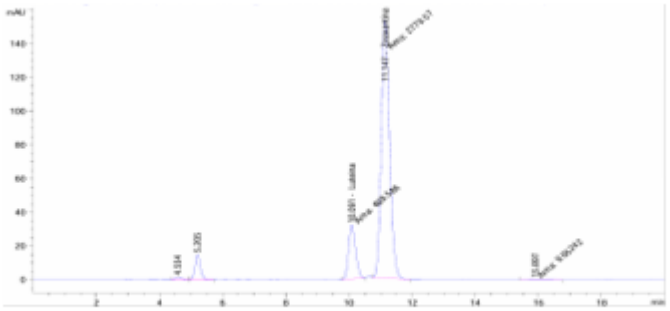


Figura 2. Cromatograma MC 20%-Carrageno.

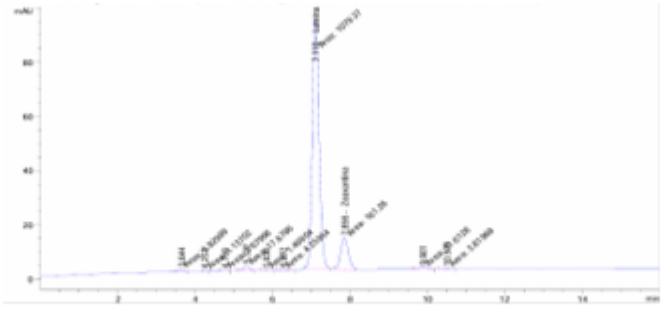


Figura 3. Cromatograma MC 20%-Almidón.

La formulación 1 MC 20% con maltodextrina presenta una concentración total de carotenoides de 190 g/kg con 159.958 g/kg de luteína y 23.906 g/kg de zeaxantina; la formulación 2 MC 20% con carrageno presenta concentración total de 254.11 g/kg con 215.815 g/kg de luteína y 28.612 g/kg de zeaxantina, la formulación 3 MC 20% con almidón tuvo una concentración de 229.76 g/kg con 32.396 g/kg de luteína y 184.33 g/kg de zeaxantina y la formulación 4 MC 20% de almidón como encapsulante y recubrimiento tuvo una concentración de 252.01 g/kg del cual 31.929 g/kg de luteína y 209.621 g/kg de zeaxantina como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Descenso de la concentración de carotenoides en las MC 20%.

Formulación	Análisis		Inicial		24h		48h		72h	
1	UV-Vis	CT g/kg	190.95		174.56		163.81		145.1	
	HPLC	%Luteína	83.77	159.958815	82.01	143.156656	81.38	133.308578	80.85	117.31335
		%Zeaxantina	12.52	23.90694	12.93	22.570608	12.62	20.672822	12.34	17.90534
Formulación	Análisis		Inicial		24h		48h		72h	
2	UV-Vis	CT g/kg	254.11		218.48		191.51		162.41	
	HPLC	%Luteína	84.93	215.815623	84.13	183.807224	83.03	159.010753	81.01	131.568341
		%Zeaxantina	11.26	28.612786	12.06	26.348688	12.48	23.900448	15.89	25.806949
Formulación	Análisis		Inicial		24h		48h		72h	
3	UV-Vis	CT g/kg	229.76		221.25		185.93		180.83	
	HPLC	%Luteína	14.1	32.39616	14.27	31.572375	13.88	25.807084	13.96	25.243868
		%Zeaxantina	80.23	184.336448	80.77	178.703625	81.45	151.439985	80.98	146.436134
Formulación	Análisis		Inicial		24h		48h		72h	
4	UV-Vis	CT g/kg	252.01		246.38		247.3		239.72	
	HPLC	%Luteína	12.67	31.929667	13.24	32.620712	13	32.149	18.72	44.875584
		%Zeaxantina	83.18	209.621918	81.6	201.04608	81.9	202.5387	77.59	185.998748

Estas formulaciones fueron sometidas a estabilidad acelerada para determinar su degradación en tiempo real; el tiempo que se tomo fueron 24h (6 meses), 48h (12 meses) y 72h (18 meses), tomando en cuenta parametros como el pH y los antioxidantes, para determinar si estos intervienen en su degradación. Los carotenoides totales en cada una de las formulaciones presentaron un desenso en su concentración inicial como se muestra en la figura 4 .

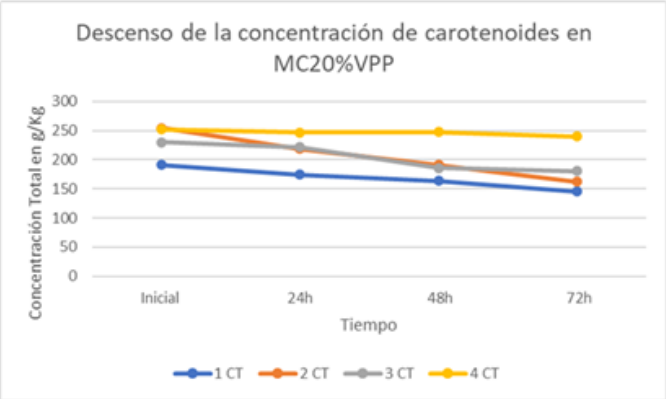


Figura 4. Descenso de la concentración de carotenoides totales en g/kg.

Se observa una disminución del contenido de carotenoides a lo largo del tiempo, cuyo decremento varía según el tipo de microencapsulación. La formulación cuatro presenta la menor pérdida de carotenoides durante las 72 h evaluadas, esto se debe a la estabilidad que presenta en la pendiente de manera constante, lo que indica que su concentración disminuye más lentamente con respecto a las demás formulaciones.

Por lo que, se realizó un análisis de la degradación de las formulaciones conforme al porcentaje de carotenoides como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Degradación de las microencapsulaciones en tiempo real.

Formulación	Análisis	24h	48h	72h
1	Degradación	8.58	14.21	24.01
2		14.84	26.32	39.04
3		3.7	19.07	21.29
4		2.23	1.86	4.87

La degradación progresiva de los carotenoides en las formulaciones indica una microencapsulación incompleta. El aumento de esta degradación a lo largo del tiempo sugiere una baja eficiencia de retención, atribuible a diversos factores fisicoquímicos: la formación de una pared de encapsulamiento demasiado delgada, una escasa compatibilidad química entre el núcleo y el material de pared, o la formación defectuosa de la microcápsula durante el proceso.

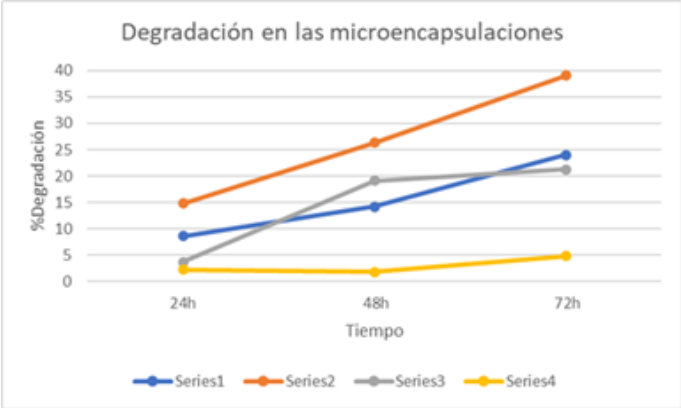


Figura 5. Degradación de carotenoides en MC 20%

En la figura 5 la serie 2 muestra la mayor degradación en comparación a la serie 4, dado a que tiene la menor degradación, lo que demuestra que el encapsulante utilizado es de gran importancia ya que determina la durabilidad del carotenoide. Por lo que el pH es un parámetro de relevancia al momento de determinar la degradación de las microencapsulaciones como se muestra la tabla 5.

Tabla 5. pH en las formulaciones.

Formulación	Análisis	Inicial	24h	48h	72h
1	pH	4.1	4.07	4.09	4.1
2		3.8	3.7	3.83	3.85
3		3.8	3.7	3.83	3.85
4		3	3.07	3.14	3.17

A pesar de mantener un pH ácido en las formulaciones, los niveles de degradación se mantienen constantes. Por lo tanto, este parámetro no determina el grosor de la capa del encapsulante ni influye directamente en la degradación de las MC20%.

CONCLUSIONES

Se determinó que el almidón es el mejor encapsulante, ya que favorece la conservación del producto. Al comparar las formulaciones 3 y 4, ambas con almidón, se observó que aplicar este polímero adicionalmente como recubrimiento (formulación 4) genera una microencapsulación más estable. Esto evitó una degradación significativa en las primeras 72 horas, lo que garantiza que la pérdida durante los primeros tres meses se mantenga dentro de los parámetros establecidos por proveedores y clientes. Como resultado, la tasa de degradación disminuyó drásticamente desde

valores superiores al 50% hasta un 4% en la formulación 4, cumpliendo así con los estándares de calidad. Finalmente, el análisis indica que las variaciones de pH y la presencia de antioxidantes no son factores determinantes en la degradación de las formulaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Gatto, L. S. (2019). Bioquímica (9.ª ed.). Reverté.
2. Britton, G., Liaaen-Jensen, S., & Pfander, H. (2008). Carotenoids: Handbook. Birkhauser Verlag.
3. Dean, J. R. (2007). *Extraction techniques in analytical sciences*. Wiley
4. Nayik, G. A., Gull, A., & Ganaie, T. A. (Eds.). (2022). *Handbook of Oleoresins: Extraction, characterization and applications*. CRC Press.
5. Parra Huertas, Ricardo Adolfo. (2010) Revisión: microencapsulación de alimentos. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 63.2: 5669-5684.
6. Rodríguez-Mena Azucena,Ochoa-Martínez Luz Araceli, González-Herrera. Silvia Marina (2023). Natural pigments of plant origin: Classification, extraction and application in foods. ELSEVIER

BIOCOLINA EN VERRACOS: UNA ESTRATEGIA SUSTENTABLE PARA OPTIMIZAR LA FERTILIDAD

Morales Evangelista Claudia Leticia [1,2*], Ríos Morales Diego [1,2], Bonilla Orea Aldo[1], Becerril Martínez Luis[3], Juárez Cortez Juan Antonio [1], Pérez Mendoza Noemí [1], Villa Mancera Abel Edmundo [1,2], Gutiérrez Pérez Oscar [4].

[1]Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
[2] Maestría en Producción Animal Sostenible, FMVZ, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
[3]Centro de Mejoramiento Genético Porcino "La Concepción", Jiquipilco, Estado de México.
[4]Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Porcina (CEIEPP), FMVZ, UNAM.
*leticia.moralesev@correo.buap.mx

RESUMEN

La eficiencia reproductiva en la producción porcina depende en gran medida de la calidad seminal de los sementales. En este contexto, la incorporación de aditivos de origen vegetal en la alimentación ha cobrado interés, ya que puede mejorar la fertilidad y contribuir a sistemas de producción más sostenibles. Además, los recientes cambios en la legislación sobre alimentación animal han impulsado la sustitución de compuestos sintéticos por alternativas naturales con propiedades nutracéuticas. Entre estas alternativas, la Biocolina destaca como un aditivo vegetal que ha demostrado efectos positivos en parámetros productivos de importancia económica. Por ello, el presente estudio propone evaluar su efecto sobre los parámetros reproductivos en verracos, considerando su posible papel en la mejora del metabolismo energético de la célula espermática. En el presente estudio se evaluaron las características espermáticas de cuatro verracos alimentados durante 60 días con una dieta suplementada con 500 mg/kg de Biocolina™ de Nuproxa®. Se recolectaron 10 eyaculados por animal (n=40) y se realizó la valoración espermática mediante microscopía de campo claro, determinando la concentración, la movilidad total y la viabilidad. Estos parámetros se utilizaron para el cálculo de las dosis seminales. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre los eyaculados de los sementales en cuanto a movilidad y viabilidad espermática (p>0.05). Sin embargo, desde el punto de vista biológico, se observó una asociación entre una adecuada movilidad y la integridad de la membrana espermática, con valores de 87.34±6.81 y 88.89±7.60 respectivamente, lo cual coincide con lo reportado por Hernández *et al*. Por otra parte, estudios previos han señalado que la suplementación con L-carnitina y ácido ascórbico puede incrementar el volumen del eyaculado y la movilidad espermática, aunque sin efectos significativos en la concentración, resultados similares a los obtenidos en este estudio (p>0.05). Finalmente, el número de dosis seminales obtenidas fue significativamente mayor (33.50±3.31; p<0.05). El estudio concluye que la inclusión estratégica de Biocolina en la dieta de verracos demostró ser una alternativa eficaz para mejorar la eficiencia reproductiva, al incrementar significativamente el número de dosis seminales con calidad espermática para su uso en programas de inseminación artificial. Lo cual plantea el uso de Biocolina como una estrategia nutricional viable, sostenible y basada en aditivos de origen vegetal para optimizar el rendimiento reproductivo en la producción porcina.

INTRODUCCIÓN

En México, la producción porcina ha mostrado un crecimiento sostenido durante la última década, impulsado por el aumento del consumo interno y el fortalecimiento de las exportaciones. Según datos del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2024), la producción nacional de carne de cerdo superó los 1.8 millones de toneladas anuales, consolidando a esta especie como una de las actividades pecuarias más relevantes para la economía agroalimentaria del país. No obstante, este crecimiento productivo plantea desafíos relacionados con la eficiencia en el uso de recursos, el bienestar animal, la reducción del impacto ambiental y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Ante este panorama, la nutrición animal ha adquirido un papel estratégico para mejorar la productividad de manera sostenible. El empleo de aditivos nutricionales funcionales permite optimizar el aprovechamiento de nutrientes, fortalecer la salud animal y reducir pérdidas productivas sin incrementar significativamente los insumos requeridos. Particularmente, los aditivos de origen vegetal han despertado un creciente interés debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, inmunomoduladoras y moduladoras de la microbiota intestinal, características que contribuyen al desarrollo de sistemas productivos más eficientes y alineados con las demandas actuales de sostenibilidad y seguridad alimentaria (Pandey et al., 2019; Corino et al., 2021).

Además de mejorar el desempeño productivo, estas estrategias nutricionales pueden contribuir indirectamente a disminuir la huella ambiental de la producción porcina. Una mayor eficiencia reproductiva permite incrementar el número de animales producidos por unidad de recurso utilizado, reduciendo los costos asociados a la reposición de reproductores y optimizando la utilización de instalaciones, alimento y agua. Por ello, la mejora de los parámetros reproductivos constituye un componente clave dentro de los programas de producción sostenible (FAO, 2023; *Corino et al.,* 2021).

La eficiencia reproductiva en los sistemas modernos de producción porcina depende en gran medida de la calidad seminal de los verracos utilizados en programas de inseminación artificial. Debido a que un solo macho puede generar miles de dosis seminales durante su vida reproductiva, pequeñas variaciones en la calidad del semen pueden tener repercusiones importantes sobre la fertilidad del hato y la rentabilidad de la explotación (Flowers, 2013). Entre los indicadores más utilizados para evaluar la capacidad fecundante destacan la concentración espermática, la motilidad, la viabilidad celular y la integridad de la membrana plasmática, parámetros estrechamente relacionados con el potencial reproductivo de los espermatozoides (Corino *et al.,* 2021).

La funcionalidad espermática depende de complejos mecanismos celulares relacionados con el metabolismo energético, la estabilidad estructural de las membranas y la capacidad antioxidante de las células. En los verracos, la elevada proporción de ácidos grasos poliinsaturados presentes en la membrana plasmática de los espermatozoides proporciona la fluidez necesaria para los procesos de capacitación y fecundación; sin embargo, también incrementa su susceptibilidad al daño oxidativo (Aitken & Baker, 2020; Hernández-Avilés *et al.,* 2024). La acumulación de especies reactivas de oxígeno puede provocar peroxidación lipídica, alteraciones mitocondriales y deterioro de la movilidad, viabilidad e integridad celular, comprometiendo la fertilidad masculina (Alak *et al.,* 2020).

Dentro de los nutrientes involucrados en la preservación de la funcionalidad celular destaca la colina, un compuesto esencial que participa en la síntesis de fosfolípidos estructurales, neurotransmisores y moléculas donadoras de grupos metilo. La fosfatidilcolina, principal derivado metabólico de la colina, constituye uno de los componentes más abundantes de las membranas biológicas y desempeña funciones fundamentales en la estabilidad, fluidez y señalización celular (Zeisel & da Costa, 2009; Wiebe *et al.,* 2021).

En años recientes, la biocolina ha surgido como una alternativa de origen vegetal para complementar los requerimientos de colina en la alimentación animal. Este aditivo contiene fosfolípidos naturales y metabolitos bioactivos capaces de participar en procesos relacionados con el metabolismo lipídico, la salud hepática y la protección antioxidante. Estudios realizados en cerdos y aves han demostrado efectos favorables sobre el crecimiento, la eficiencia productiva, la salud intestinal y diversos indicadores metabólicos (Petrolli *et al.,* 2021; Qiu *et al.,* 2021; Zhong *et al.,* 2022; Dazuk *et al.,* 2023). Sin embargo, la información relacionada con sus posibles efectos sobre la calidad seminal de los verracos continúa siendo limitada.

Considerando la necesidad de implementar estrategias nutricionales sostenibles que permitan optimizar la eficiencia reproductiva y productiva de la industria porcina, resulta relevante evaluar el potencial de la biocolina como aditivo funcional en la alimentación de reproductores. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la adición en la dieta de biocolina sobre los parámetros de calidad seminal y funcionalidad espermática de verracos utilizados en programas comerciales de inseminación artificial.

TEORÍA

La eficiencia reproductiva de los verracos depende en gran medida de la capacidad funcional de los espermatozoides, la cual está determinada por una serie de características estructurales y fisiológicas que influyen directamente sobre la fertilidad. Entre los indicadores más utilizados para estimar el potencial reproductivo destacan la concentración, la motilidad, la viabilidad celular y la integridad de la membrana plasmática, parámetros que reflejan el estado metabólico y funcional de las células espermáticas (Flowers, 2013; Corino *et al.,* 2021). Sin embargo, la fertilidad masculina no depende exclusivamente de estas variables convencionales, sino también de mecanismos relacionados con la protección antioxidante, el metabolismo energético y la estabilidad de las membranas celulares.

Los espermatozoides porcinos presentan una elevada susceptibilidad al daño oxidativo debido a la abundancia de ácidos grasos poliinsaturados presentes en sus membranas. Esta característica les confiere la fluidez necesaria para participar en procesos como la capacitación, la reacción acrosomal y la fecundación; sin embargo, también incrementa el riesgo de peroxidación lipídica cuando existe un desequilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno y los sistemas antioxidantes celulares (Aitken & Baker, 2020; Hernández-Avilés *et al.,* 2024). Como consecuencia, pueden producirse alteraciones en la actividad mitocondrial, pérdida de movilidad, reducción de la viabilidad y deterioro de la capacidad fecundante de los espermatozoides (Alak *et al.,* 2020).

Debido a esta vulnerabilidad fisiológica, durante los últimos años se ha incrementado el interés por el uso de estrategias nutricionales dirigidas a mejorar el ambiente metabólico y antioxidante del organismo. Dentro de estas alternativas, los compuestos bioactivos derivados de plantas han mostrado resultados prometedores por su capacidad para modular procesos inflamatorios, mejorar la utilización de nutrientes y reducir el estrés oxidativo (Pandey *et al.,* 2019). En producción porcina, diversos estudios han demostrado que los fitobióticos pueden ejercer efectos favorables sobre parámetros productivos y reproductivos, favoreciendo la calidad seminal y la funcionalidad de los gametos masculinos (Tu *et al.,* 2023).

Entre los nutrientes involucrados en estos procesos destaca la colina, considerada esencial para el metabolismo celular debido a su participación en la síntesis de fosfolípidos, neurotransmisores y compuestos donadores de grupos metilo (Zeisel & Da Costa, 2009). La colina forma parte de moléculas estructurales como la fosfatidilcolina y la esfingomielina, fundamentales para la organización y estabilidad de las membranas celulares. Asimismo, interviene en mecanismos relacionados con el metabolismo de lípidos, la comunicación intercelular y la regulación epigenética mediante reacciones de metilación (Wiebe *et al.,* 2021; Petrolli *et al.,* 2021).

En este contexto, la biocolina ha surgido como una fuente vegetal alternativa de colina caracterizada por contener fosfolípidos naturales y metabolitos secundarios de origen botánico. Su utilización en nutrición animal ha despertado interés debido a su potencial para mejorar la biodisponibilidad de compuestos relacionados con el metabolismo lipídico y la integridad celular. Investigaciones recientes en cerdos han documentado modificaciones favorables sobre la microbiota intestinal, el estado metabólico y algunos indicadores productivos tras la suplementación con fuentes vegetales de colina (Qiu *et al.,* 2021; Zhong *et al.,* 2022).

La interacción entre salud intestinal y función reproductiva ha cobrado relevancia en los últimos años. Se ha propuesto que una microbiota equilibrada favorece una mejor absorción de nutrientes, disminuye procesos inflamatorios sistémicos y optimiza la disponibilidad energética requerida para funciones reproductivas complejas (Corino *et al.,* 2021). Por ello, los beneficios observados con la suplementación de biocolina podrían extenderse más allá de los efectos directos sobre el metabolismo hepático y lipídico, contribuyendo indirectamente a la calidad seminal.

Los efectos positivos de la biocolina también han sido descritos en otras especies animales. En aves comerciales se han reportado mejoras en el metabolismo hepático, la utilización de grasas y los parámetros productivos, atribuidas principalmente a su participación en el transporte de lípidos y en

la protección frente al estrés oxidativo (Petrolli *et al.,* 2021). De manera similar, estudios realizados en cerdos durante etapas de crecimiento y finalización han señalado reducciones en biomarcadores asociados con la peroxidación lipídica y una mejor respuesta productiva tras su inclusión en la dieta (Dazuk *et al.,* 2023).

Diversos suplementos nutricionales utilizados en reproducción animal comparten mecanismos de acción comparables con los atribuidos a la biocolina. La L-carnitina y el ácido ascórbico, por ejemplo, han demostrado efectos favorables sobre la movilidad, viabilidad y funcionalidad espermática al mejorar la producción energética y fortalecer los sistemas antioxidantes celulares (Lenzi *et al.,* 2004; Morales *et al.,* 2024). Estas observaciones sugieren que nutrientes capaces de preservar la integridad de las membranas y reducir el daño oxidativo pueden contribuir significativamente al mantenimiento de la calidad seminal.

A pesar de la creciente evidencia sobre los beneficios metabólicos y antioxidantes de las fuentes vegetales de colina, la información disponible acerca de sus efectos directos sobre la calidad espermática de verracos sigue siendo limitada. En consecuencia, resulta necesario ampliar el conocimiento sobre su impacto en parámetros seminales relacionados con la fertilidad, con el fin de evaluar su potencial como herramienta nutricional dentro de programas modernos de reproducción porcina.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el Centro de Mejoramiento Genético Porcino (CEMEGEPO) “La Concepción”, ubicado en Santa Cruz Tepexpan, Jiquipilco, Estado de México, durante el periodo comprendido entre octubre y diciembre. Se incluyeron cinco sementales porcinos adultos de diferentes líneas genéticas, clínicamente sanos y mantenidos bajo condiciones estandarizadas de alimentación, manejo y bioseguridad.

Para evaluar el efecto de la suplementación con biocolina sobre la calidad seminal, se utilizó BioCholine® (Nuproxa®), incorporado al alimento comercial a una dosis de 500 mg/kg de alimento. La suplementación se administró diariamente durante 60 días previos al inicio de las evaluaciones seminales, con el objetivo de abarcar un ciclo completo de espermatogénesis.

Las variables evaluadas incluyeron volumen del eyaculado, concentración espermática, movilidad progresiva, viabilidad y número de dosis seminales producidas por eyaculado. Las colectas de semen se realizaron mediante la técnica de la mano enguantada (Figura 1) y las muestras fueron procesadas inmediatamente después de su obtención (Figura 2). El volumen seminal se determinó mediante medición directa en recipientes graduados; la concentración espermática se cuantificó utilizando un fotómetro SDM 6 Minitube®; la movilidad progresiva y la viabilidad espermática se evaluaron mediante microscopía de campo claro.

Como referencia basal (grupo control), se utilizaron los registros históricos de desempeño reproductivo almacenados en la base de datos del Centro de Mejoramiento Genético Porcino (CEMEGEPO) para cada semental de la misma temporada de evaluación. Estos registros incluyeron las mismas variables seminales evaluadas antes de la suplementación. Posteriormente, los valores obtenidos durante el periodo de suplementación con biocolina fueron comparados con los registros históricos individuales de cada animal, permitiendo determinar el efecto de la adición de biocolina sobre los parámetros de calidad seminal y la producción de dosis seminales.

Las evaluaciones se realizaron semanalmente durante el periodo experimental y los resultados fueron analizados comparando los valores previos y posteriores a la suplementación para cada semental.



Figura 1: Colecta de eyaculado de verraco mediante la técnica de la mano



Figura 2: Evaluación con microscopio de campo claro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La asociación observada entre la movilidad espermática y la integridad de la membrana plasmática coincide con lo descrito por Hernández-Avilés *et al.* (2024), quienes señalan que la preservación de la estructura membranal es indispensable para mantener la funcionalidad celular y la capacidad fecundante de los espermatozoides. La integridad de la membrana permite conservar la homeostasis celular, la actividad mitocondrial y los mecanismos de producción de energía necesarios para el movimiento progresivo de los espermatozoides, por lo que ambos parámetros suelen presentar una estrecha relación (Aitken & Baker, 2020).

Los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con investigaciones recientes que han demostrado que diversos aditivos nutricionales de origen natural mejoran principalmente parámetros funcionales de la calidad seminal. Han *et al.* (2022) reportaron que la suplementación con oligosacáridos de alginato en verracos incrementó significativamente la concentración y motilidad espermática, además de mejorar la calidad seminal mediante modificaciones favorables en la microbiota intestinal y en los metabolitos presentes en sangre y semen (Han *et al.,* 2022).

De manera similar, Tu et al. (2023) observaron que la inclusión de aditivos fitogénicos derivados de plantas medicinales mejoró la calidad seminal y la capacidad reproductiva de verracos reproductores, evidenciando incrementos en parámetros relacionados con la movilidad espermática y el desempeño reproductivo general. Los autores atribuyeron estos efectos a la actividad antioxidante de los compuestos bioactivos y a una mejor regulación metabólica y hormonal.

Recientemente, Hu *et al.* (2024), demostraron que el ácido protocatecuico, un polifenol natural con elevada capacidad antioxidante, mejoró diversos indicadores de calidad seminal en verracos, particularmente aquellos relacionados con la protección celular frente al daño oxidativo y el mantenimiento de la funcionalidad espermática.

Asimismo, Wang *et al.* (2025) reportaron que la suplementación con ácido 5-aminolevulínico (5-ALA) mejoró significativamente la calidad seminal y el desempeño reproductivo de verracos mediante el fortalecimiento de la función mitocondrial espermática, la reducción del daño oxidativo al ADN y la optimización de la fosforilación oxidativa. Estos hallazgos son particularmente relevantes porque

sugieren que la mejora de la eficiencia energética celular constituye un mecanismo clave para incrementar la funcionalidad espermática.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran una tendencia similar, ya que el incremento del volumen seminal y del número de dosis producidas por eyaculado ocurrió sin modificaciones significativas en la concentración espermática ($p>0.05$), lo que sugiere que la suplementación con Biocolina® podría ejercer sus efectos principalmente sobre la funcionalidad celular y el ambiente metabólico de los tejidos reproductivos. Considerando que la colina participa en la síntesis de fosfatidilcolina, uno de los principales componentes estructurales de las membranas celulares, es posible que su suplementación contribuya al mantenimiento de la integridad membranal y al metabolismo energético de los espermatozoides.

En conjunto, la evidencia reciente indica que los aditivos nutricionales con propiedades antioxidantes, fitogénicas o moduladoras del metabolismo energético tienden a mejorar principalmente parámetros funcionales de la calidad seminal, como la movilidad, la viabilidad y la producción de dosis seminales, mientras que los efectos sobre la concentración espermática suelen ser más variables entre estudios.

Cuadro 1: Valores espermáticos de sementales con adición de Biocolina

ID semental	Volumen (ml)	Concentración (millones x ml)	Movilidad Total (%)	Viabilidad (%)
Jack	135.40±12.81	1.30±2.49	86.34±0.2	88.04±1.62
Junior	80.60± 7.34	0.83±0.1	85.10±1.0	85.94±1.14
Pirata	152.10±11.34	0.56±0.53	81.61±0.2	82.62±2.71
Pitzotl	124.90±9.82	0.90±1.05	87.34±0.2	88.89±2.40

Cuadro 1: Los valores representan medias±ee. El asterisco (*) indica diferencias significativas (*$p<0.05$*) entre los eyaculados de los sementales (n=40).

Uno de los hallazgos más relevantes fue el incremento en el número promedio de dosis seminales producidas por eyaculado (Figura 3). La suplementación con BioCholine® aumentó la producción de 19 a 23 dosis por eyaculado, lo que representa un incremento de cuatro dosis adicionales. Considerando un valor comercial de $380 MXN por dosis seminal, este aumento generó un ingreso adicional de $1,520 MXN por eyaculado. Debido a que el costo adicional de suplementación fue de únicamente $12.18 MXN por animal, se obtuvo un beneficio neto de $1,507.82 MXN, con un retorno sobre la inversión (ROI) de 12,379.47% y una relación beneficio de 124.79:1.

Estos resultados evidencian la elevada rentabilidad económica asociada con la inclusión de BioCholine® en la alimentación de verracos. De acuerdo con Santiago y Huerta (2024), incluso pequeñas mejoras en los parámetros productivos pueden traducirse en beneficios económicos significativos cuando se implementan de forma continua en sistemas reproductivos intensivos. En este sentido, el incremento observado en la producción de dosis seminales representa una ventaja relevante para los sistemas comerciales de producción porcina.

Adicionalmente, la suplementación con BioCholine® podría constituir una estrategia nutricional de interés durante la temporada de calor. El estrés térmico en los verracos se ha asociado con una reducción en la producción seminal y alteraciones en la calidad espermática, particularmente en los parámetros de motilidad y concentración espermática (Suis H. et al., 2022). Por lo tanto, los efectos observados sobre el volumen seminal y la producción de dosis sugieren que BioCholine® podría contribuir a mitigar parcialmente las pérdidas productivas asociadas con condiciones de estrés por calor, aunque se requieren estudios específicos para confirmar esta hipótesis.

Cuadro 2: Número de dosis seminales de los datos previamente registrados del CEMEGEPO y con la adición de Biocolina

ID SEMENTAL	Registro de dosis antes de Biocolina	Biocolina
Jack	15,57 ± 2,26	20.30±1.87*
Junior	21.71±2.04	25.50±2.66*
Pirata	24.00±2.45	24.70±1.55
Pitzotl	18.86 ± 2.84	33.50±31.05*

La producción promedio de dosis seminales presentó un comportamiento uniforme durante las 10 semanas de suplementación con Biocolina. El mayor valor se observó en la semana 7 (30.5 ± 2.3 dosis por eyaculado); sin embargo, las diferencias entre semanas no fueron estadísticamente significativas (P=0.33). Estos resultados indican que la suplementación permitió sostener una producción seminal consistente a lo largo del periodo experimental, evidenciando una respuesta productiva estable y una adecuada eficiencia reproductiva de los verracos bajo las condiciones del estudio. Es importante enfatizar que la ausencia de fluctuaciones sugiere que la suplementación favoreció el mantenimiento de una capacidad productiva estable, aspecto de relevancia en centros de inseminación artificial donde la constancia en la producción de dosis seminales es un factor clave para la eficiencia operativa y económica.

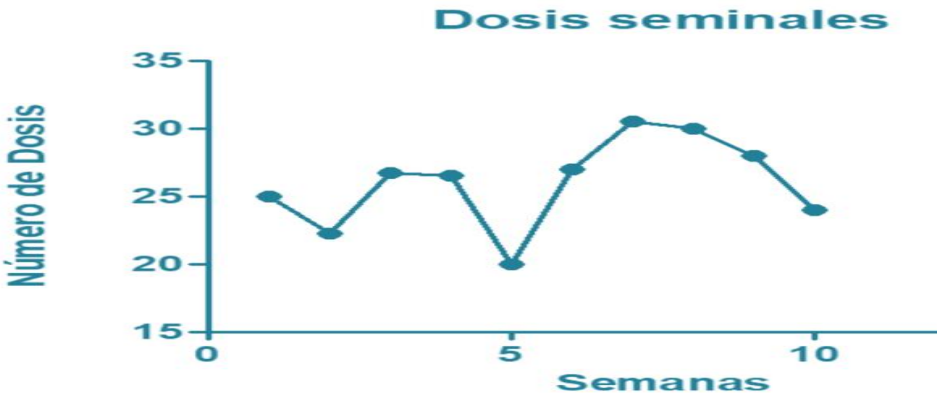


Figura 3: Número de dosis obtenidas de los eyaculados de los verracos, durante diez semanas del experimento de los dos periodos en los que se evaluó a cada semental.

CONCLUSIONES

La suplementación con Biocolina mejoró parámetros reproductivos de importancia productiva en verracos, reflejándose en un mayor volumen seminal y un incremento en la producción de dosis por eyaculado, sin afectar negativamente la concentración, motilidad ni la integridad de membrana espermática. Estos resultados sugieren que la Biocolina podría favorecer la funcionalidad reproductiva mediante mecanismos asociados con el metabolismo lipídico, la estabilidad de las membranas celulares y el mantenimiento de la actividad metabólica espermática.

Además, el aumento en el número de dosis seminales generó un beneficio económico significativo, destacando su potencial como estrategia nutricional para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de inseminación artificial. No obstante, son necesarios estudios complementarios que evalúen marcadores metabólicos, estrés oxidativo y fertilidad in vivo para esclarecer los mecanismos involucrados y confirmar su efecto sobre el metabolismo energético de la célula espermática.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aitken, R. J., & Baker, M. A. (2020). Oxidative stress, sperm survival and fertility control.
2. Alak, G., et al. (2020). Oxidative stress and sperm function in mammals.
3. Boe-Hansen, G. B., et al. (2018). Semen quality and fertility in boars.
4. Corino, C., Di Giancamillo, A., Modina, S. C., & Rossi, R. (2021). Prebiotic Effects of Seaweed Polysaccharides in Pigs. Animals, 11(6), 1573. https://doi.org/10.3390/ani11061573
5. Dazuk, V., Tarasconi, L., Molosse, V. L., Cécere, B. G. O., Deolindo, G. L., Strapazzon, J. V., Bottari, N. B., Bissacotti, B. F., Schetinger, M. R. C., Sareta, L., Mendes, R. E., Vedovatto, M., Gloria, E. M., Paiano, D., Galli, G. M., & Da Silva, A. S. (2023). Can the Inclusion of a Vegetable Biocholine Additive in Pig Feed Contaminated with Aflatoxin Reduce Toxicological Impacts on Animal Health and Performance? Animals, 13(19), 3010. https://doi.org/10.3390/ani13193010
6. Durairajanayagam, D. (2018). Oxidative stress and male infertility.
7. FAO. (2023). *World livestock and food security report*.
8. Flowers, W. L. (2013). Factors affecting fertility in boars.
9. Han, H., Zhou, Y., Xiong, B., Zhong, R., Jiang, Y., Sun, H., ... & Zhang, H. (2022). *Alginate oligosaccharides increase boar semen quality by affecting gut microbiota and metabolites in blood and sperm*. Frontiers in Microbiology, 13, 982152.
10. Hernández-Avilés, C., Ramírez-Agámez, L., Weintraub, S.T. et al. Proteomic analysis of sperm from fertile stallions and subfertile stallions due to impaired acrosomal exocytosis. Sci Rep 14, 12446 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-63410-3.
11. Hu, R., Yang, X., Gong, J., Lv, J., Yuan, X., Shi, M., ... & Wu, S. (2024). *Patterns of alteration in boar semen quality from 9 to 37 months old and improvement by protocatechuic acid*. Journal of Animal Science and Biotechnology, 15, 78.
12. Lenzi, A., et al. (2004). L-carnitine treatment and sperm quality.
13. Morales ECL. (2024). Adición de L-carnitina y ácido ascórbico para mejorar la calidad espermática de verracos potencialmente fértiles. Porcicultura.com. https://www.porcicultura.com/articulos/adicion-de-l-carnitina-y-acido-ascorbico-para-mejorar-la-calidad-espermatica-de-verracos-potencialmente-fértiles.
14. Pandey, A. K., et al. (2019). Phytogenic feed additives in animal nutrition.
15. Pandey, S., Kim, E. S., Cho, J. H., Song, M., Doo, H., Kim, S., Keum, G. B., Kwak, J., Ryu, S., Choi, Y., Kang, J., Choe, J., & Kim, H. B. (2023). Cutting-edge knowledge on the roles of phytobiotics and their proposed modes of action in swine. Frontiers In Veterinary Science, 10. https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1265689
16. Petrolli, T. G., Petrolli, R. R., Aniecevski, E., Facchi, C. S., Leite, F., Dal Santo, A., Pagnussatt, H., & Calderano, A. A. (2021). Vegetable choline as a replacement for choline chloride in broiler feed. Acta Scientiarum. Animal Sciences, 43(1), e53265. https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v43i1.53265
17. Qiu, Y., et al. (2021). Effects of choline supplementation on gut microbiota and performance in pigs.

18. Tu, W., Zhang, W., Wang, H., Zhang, Y., Huang, J., Li, B., ... & Wu, X. (2023). *Effects of Chinese herbal feed additives on the sperm quality and reproductive capacity in breeding boars*. Frontiers in Veterinary Science, 10, 1231833.
19. Wang, S., Wang, Q., Zeng, X., Min, L., Zeng, W., Adetunji, A. O., & Zhu, Z. (2025). *5-Aminolevulinate acid improves boar semen quality by enhancing the sperm mitochondrial function*. Theriogenology, 239, 117389.
20. Wiebe, N., et al. (2021). Choline metabolism and animal physiology.
21. Zeisel, S. H., & da Costa, K. A. (2009). Choline: An essential nutrient for public health.
22. Zhong, W., Hu, L., Zhao, Y., Li, Z., Zhuo, Y., Jiang, X., Li, J., Zhao, X., Che, L., Feng, B., Lin, Y., Xu, S., Fang, Z., & Wu, D. (2022). Effects of dietary choline levels during pregnancy on reproductive performance, plasma metabolome, and gut microbiota of sows. Frontiers in Veterinary Science, 8, 771228. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.771228

EFECTO DEL HUMUS DE LOMBRIZ EN EL CULTIVO DEL RÁBANO *(Raphanus Sativus* L.*)*

Lucelia Mora Ojendiz, Heidi Guadalupe Carrillo Garcia, Cesar Cristobal Hernandez, Eugenia Pacheco Cantu

Universidad Intercultural Del Estado De Guerrero
lucy-uaaan@hotmail.com

RESUMEN

El modelo de agricultura orgánica aboga por usar fertilizantes y otros productos naturales, donde el bienestar de la naturaleza y de las personas es igual de importante que producir alimentos. Ante este tenor, actualmente los productos orgánicos son utilizados en la fertilización de cultivos, tal es el caso del cultivo de rábano, debido a que es una hortaliza compuesta por un gran porcentaje por agua, lo que lo hace ser bajos en calorías, significa que el cuerpo se mantiene hidratado. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar diferentes dosis de humus de lombriz en el cultivo de rábano, siendo los objetivos específicos: Evaluar el efecto de las diferentes dosis de humus de lombriz, a partir de las variables de crecimiento: altura de la planta, número de hojas y diámetro del tallo y determinar cuál es la dosis más eficiente en cuanto al rendimiento obtenido del abono orgánico utilizado, a partir del peso del rábano. El presente trabajo presenta un enfoque cuantitativo, con un alcance de tipo explicativo, en donde se utilizó un diseño experimental basado en bloques completos al azar, con 4 tratamientos y 3 repeticiones. En donde el Tratamiento 1 fue el testigo, el Tratamiento 2 consistió en 1 kg de humus, el Tratamiento 3 se aplicó 2 kg y el Tratamiento 4 se utilizó 3 kg de humus en cada unidad experimental. Además de dar manejo agronómico como deshierbe, riego, entre otros. Las variables evaluadas fueron emergencia, altura de la planta, numero de hojas, diámetro del tallo y peso. Los datos se analizaron con un programa estadístico SAS, obteniendo un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias (Prueba de Tukey). En cuanto a los resultados, para el caso de la variable emergencia, el mejor tratamiento estadísticamente lo obtuvo el T4, con 90.2%, mientras que el testigo fue el tratamiento con menor porcentaje siendo este de 67.9%; para la variable altura de las plantas, el mejor tratamiento fue el T4 con una altura de 48.4 cm, mientras que el testigo presentó 26.8 cm; el número de hojas, el mejor tratamiento fue el T4 con 8.11 hojas, mientras que el tratamiento con menor promedio fue el T2 con 6.0 hojas; en el caso de la variable diámetro los tratamientos T4 y T3 fueron estadísticamente iguales, con 14.4 mm y 13.6 mm respectivamente, mientras que el testigo presentó 10.4 mm de diámetro; por último la variable peso del rábano con follaje, la comparación de medias mostró que el mayor peso lo obtuvo el T4 siendo estadísticamente el mejor tratamiento presentando un valor de 61.0 gr, por su parte el T1 obtuvo 20.2 gr siendo el tratamiento con menor peso. La fertilización es una actividad primordial para los cultivos, sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes químicos, puede causar problemas ambientales como la degradación del suelo, contaminación del agua, aire, entre otros. En ese sentido la utilización de abonos orgánicos puede convertirse en una alternativa sustentable.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la agricultura ocupa un lugar importante, ya que garantiza la producción de alimentos, sin embargo, el incremento poblacional provoca la intensificación de prácticas agrícolas, que comúnmente llevan al uso de agroquímicos, misma que representa un problema al medio ambiente. La agricultura convencional depende de la aplicación de fertilizantes minerales solubles, con el fin de lograr mayor rendimiento en los cultivos. Pero la aplicación excesiva ha producido: eutrofización, toxicidad de las aguas, contaminación de aguas subterráneas, contaminación del aire, degradación del suelo y de los ecosistemas, desequilibrios biológicos y reducción de la biodiversidad (Ulibarry, 2019).

Por lo anterior, actualmente la agricultura orgánica está ganando cada vez más importancia entre los productores agrícolas que miran con preocupación las consecuencias que genera el cambio climático en el mundo. El modelo de agricultura orgánica aboga por usar fertilizantes y otros productos 100% naturales, donde el bienestar de la naturaleza y de las personas es igual de importante que producir alimentos (Cherlinka, 2025).

En este sentido, la característica principal de los productos orgánicos es que su proceso de producción está libre de plaguicidas y fertilizantes químicos. Son productos libres de hormonas, antibióticos, colorantes y saborizantes artificiales. Además de ofrecer productos que traen beneficios para la salud al ser humano, colabora con detener significativamente daños al medio ambiente y a la tierra de cultivo (Compartido, 2017).

Ante este tenor, actualmente los productos orgánicos son utilizados en la fertilización de cultivos, tal es el caso del cultivo de rábano, debido a que es una hortaliza compuesta por un gran porcentaje por agua, lo que significa que el cuerpo se mantiene hidratado. También ayudan a eliminar toxinas. Favorecen no solo al sistema digestivo, sino también los riñones, la vesícula, el hígado y el sistema circulatorio en general. Al ser rico en vitamina C, es un importante antioxidante. Es una vitamina clave ya que ayuda al sistema inmunológico (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar diferentes dosis de humus de lombriz en el cultivo de rábano. En donde los resultados mostraron que el T4 (3 kg de humus de lombriz) presentó los valores más altos en las variables emergencia, altura de la planta, número de hojas, diámetro y peso del rábano.

TEORÍA

La agricultura orgánica no implica solo el hecho de fertilizar con abonos orgánicos (composta, fermento, lombricomposta, entre otros) el suelo, sino conlleva un cambio de conciencia, un camino con muchos pasos, donde el primero está en la cabeza de cada uno, el querer creer y cambiar (Félix-Herrán et al., 2008).

Este autor, menciona que este movimiento está regido por cuatro principios básicos: el primero implica el maximizar los recursos (al interior) que la gente posee; no busca sustituir insumos, sino la reutilización de los que la gente posee, el segundo implica el buscar al máximo la independencia de insumos externos, al utilizar lo que tiene a la mano y volviéndose productor de sus agro insumos, el tercero se enfoca a provocar el menor impacto posible dentro de la modificación que se haga al lugar y su entorno (las actividades humanas son las que más impactan al ambiente), el cuarto es no poner en riesgo la salud del productor ni del consumidor; este último haciendo alusión a los consultores y vendedores de abonos orgánicos que no están bien estabilizados, y que su efecto no es igual al de un abono estable que pasó cierto tiempo de maduración.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la presente investigación se utilizó un diseño experimental basado en bloques completos al azar, con 4 tratamientos y 3 repeticiones. Siendo un total de 12 unidades experimentales donde cada unidad experimental consistió de 1m². Para la aplicación de los tratamientos (humus de lombriz) se baso en lo recomendado por Díaz et al. (2023) los cuales mencionan que la dosis recomendada de humus de lombriz es de 1 kg/m² en forma solida en el momento de la preparación del suelo (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Referencia	Descripción
1	T1	Testigo
2	T2	1 kg de humus
3	T3	2 kg de humus
4	T4	kg de humus

Una vez determinadas las dosis, se procedió a aplicarlas en el área experimental. Para esto fue necesario remover la tierra de cada unidad experimental con la ayuda de un pico, una pala y un rastrillo, se removió 30 cm de profundidad. Después de esto se aplicó el humus de lombriz y se incorporo el humus con la tierra (Figura 1).

Figura1. Remoción de la tierra en las unidades experimentales.



Se utilizó el método de siembra directa, 5 surcos con distancia de 20 cm por surco y 7 cm de distancia entre planta y planta, en total se sembraron 180 semillas por unidad experimental, en donde cada unidad representó una repetición. El control de maleza se realizó manualmente, al realizar esta actividad evitamos que compita con el cultivo por el agua, luz y nutrientes, del mismo modo se evitan plagas y enfermedades para que no reduzca el crecimiento y la calidad del rábano

Los riegos se realizaron manualmente con una regadera de jardín, normalmente por las mañanas. La cosecha se realizó manualmente (Figura 2), se inició regando las plantas de cada unidad experimental, posteriormente se sacaron las plantas.

Figura 2. Cosecha.



Las variables evaluadas fueron emergencia, la cual se evaluó a los 7 días después de la siembra, para la altura de la planta, número de hojas y diámetro las evaluaciones se realizaron a los 18 y 44 días, por su parte el peso del rábano se evaluó al finalizar el cultivo a los 44 días.

Los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas en el presente trabajo se capturaron en una base de datos en el programa Excel. Posteriormente se analizaron los datos con un programa estadístico SAS Studio, donde se obtuvieron los resultados del análisis de varianza y la prueba de comparación de medias (Prueba de Tukey).

RESULTADOS

Con respecto a la comparación de medias para la emergencia, los resultados muestran que los tratamientos presentan diferencias, en el T4 y T3 se presenta el mayor porcentaje de emergencia siendo estadísticamente iguales, seguido del T2 y T1 (Tabla 2).

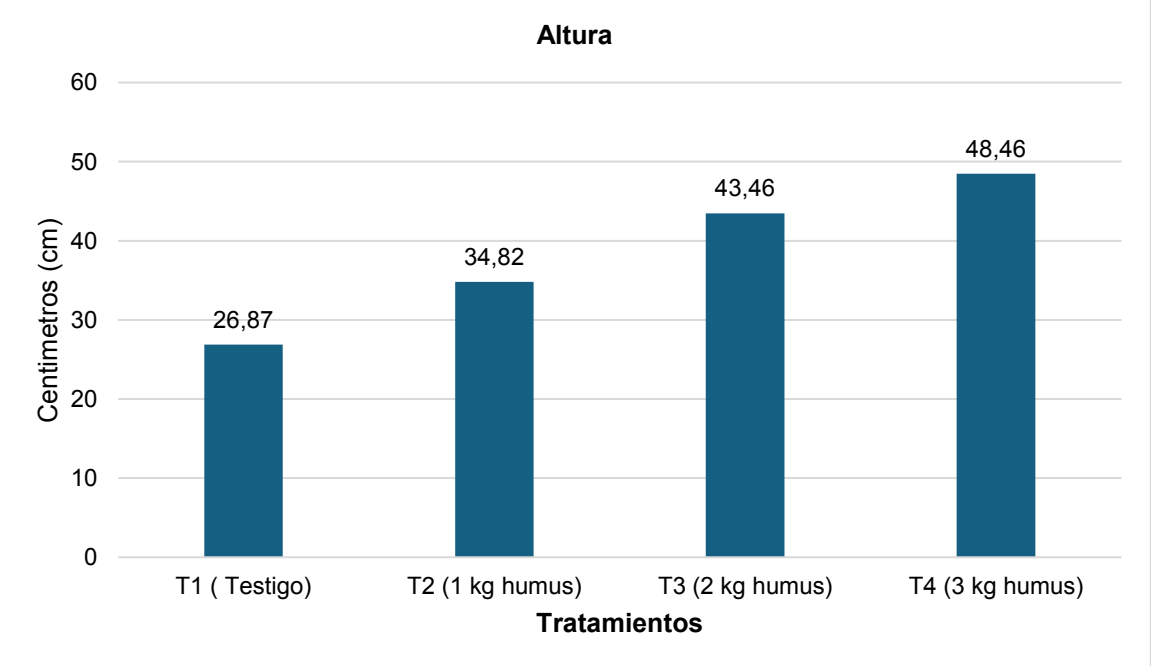
Tabla 2. Prueba de comparación de medias (Prueba de Tukey) para la variable emergencia.

Tratamiento	Media %	Agrupación t
T4	90.2333	A
T3	86.9333	A
T2	69.8333	B
T1	67.9333	B

Agrupamiento t: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En el caso de la altura de las plantas la comparación de medias refleja que hay diferencias entre los tratamientos, donde se muestra que el T4 es el mejor tratamiento ya que presenta la mejor altura de la planta con 48.4 cm, seguido por el T3 con 43.4 cm, el T2 con 34.8 cm y por último el T1 presentó 26.8 cm el cual fue el tratamiento con menor altura de planta (Figura 3).

Figura 3. Representación gráfica de la variable altura de las plantas.



El número de hojas mostró que el T4 presentó en promedio 8.11 hojas, seguido del T3 con un promedio de 7.3, el T1 con 6.5 y por último el T2 con 6.0 (Tabla 3).

Tabla 3. Prueba de comparación de medias (Prueba de Tukey) para la variable número de hojas.

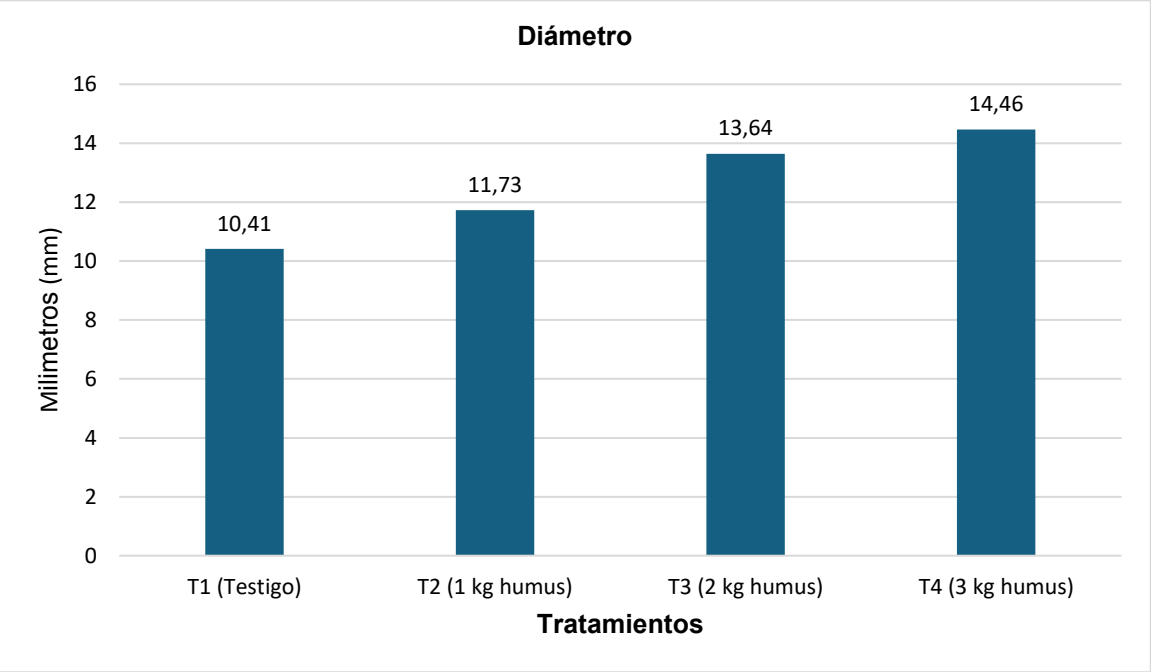
Tratamiento	Media	Agrupación t
T4	8.1100	A
T3	7.3000	AB

T1	6.5567	B
T2	6.0267	B

Agrupamiento t: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

La comparación de medias en la variable diámetro arrojó que el T4 y T3 son estadísticamente iguales y fueron los tratamientos que presentaron mayor valor, 14.4 mm y 13.6 mm respectivamente, por su parte el T2 y T1 son iguales estadísticamente, sin embargo, el T1 presentó el valor más bajo con 10.4 mm (Figura 4).

Figura 4. Representación gráfica de la variable diámetro de la planta.



Para la variable peso del rábano con follaje, de acuerdo al ANOVA realizado (P≤0.05) para la variable peso de rábano, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 4).

Tabla 4. Resultado del análisis de varianza para la variable peso del rábano.

FV	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F cal	Pr > F
Bloques	2	7.801667	3.900833	4681.00	<.0001
Tratamientos	3	2786.642500	928.880833	1114657	<.0001
Error	6	0.005000	0.000833		
Total	11	2794.449167			

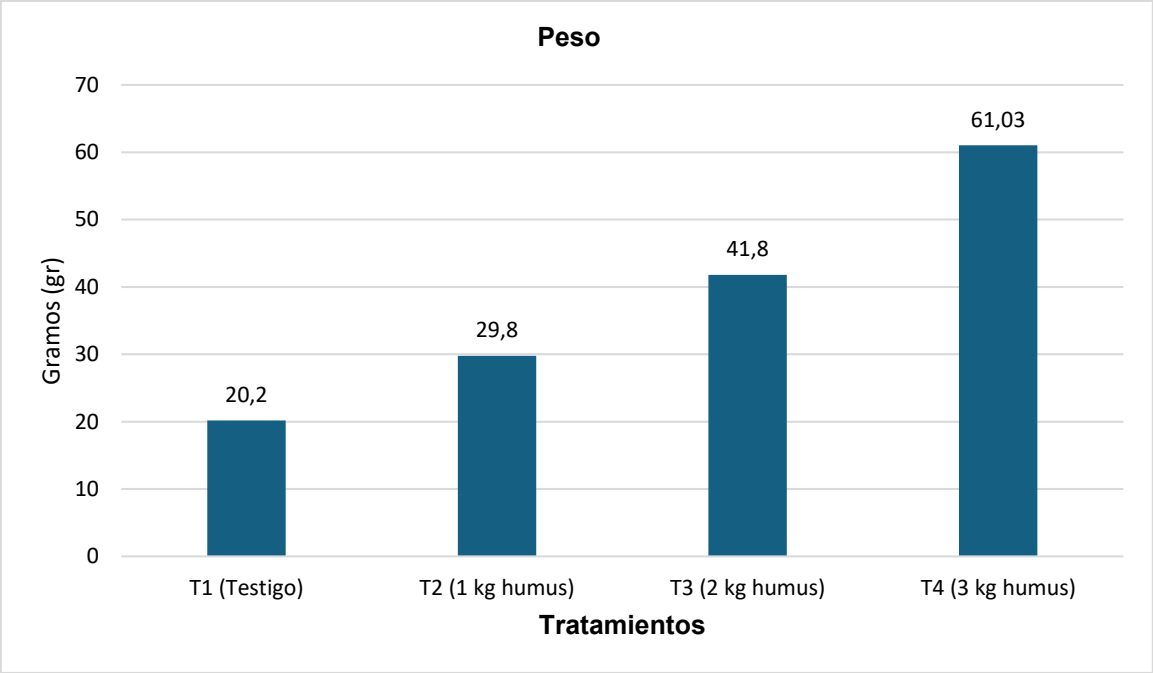
La comparación de medias para esta variable (Peso del rábano) muestra que el T4 es el mejor tratamiento presentando el mayor peso con un valor de 61.0 gr, seguido del T3 con un peso de 41.8 gr, el T2 con un peso de 29.8 gr y por último el T1 con 20.2 el cual fue el tratamiento con menor peso (Tabla 5 y Figura 5).

Tabla 5. Prueba de comparación de medias (Prueba de Tukey) para la variable peso del rábano.

Tratamiento	Media	Agrupación t
T4	61.0333	A
T3	41.8000	B
T2	29.8000	C
T1	20.200	D

Agrupamiento T: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes

Figura 5. Representación gráfica de la variable peso del rábano.



CONCLUSIONES

La fertilización es una actividad primordial para los cultivos, sin embargo el uso intensivo de fertilizantes químicos, puede causar problemas ambientales como la degradación del suelo, contaminación del agua, aire, entre otros. En ese sentido la utilización de abonos orgánicos puede convertirse en una alternativa sustentable. Ante este tenor, los resultados obtenidos muestran el efecto de los tratamientos utilizados en este trabajo de investigación.

En el caso de la variable emergencia, el mejor tratamiento estadisticamente lo obtuvo el T4, con un resultado de 90.2%, mientras que el testigo fue el tratamiento con menor porcentaje siendo este de 67.9%.

Los resultados para la variable altura de las plantas, en la primera evaluación mostraron que el T3 y T4 son estadisticamente iguales, de tal manera que ambos tratamientos presentaron 18.9 cm siendo los mejores tratamientos, por su parte el T1 (testigo) presentó 14.0 cm. En la segunda evaluación el mejor tratamiento estadisticamente fue el T4 con una altura de 48.4 cm, mientras que el testigo presentó 26.8 cm.

Otra de las variables evaluadas fue el número de hojas, en la primera evaluación todos los tratamientos fueron estadisticamente iguales, con un promedio de 5.6 hojas. Para la segunda evaluación el mejor tratamiento fue el T4 con 8.11 hojas, mientras que el tratamiento con menor promedio fue el T2 con 6.0 hojas.

Los resultados del diámetro para la primera evaluación muestran que el T4 fue el mejor tratamiento con 6.6 mm, mientras que el T1 (testigo) fue el tratamiento que obtuvo el valor más bajo presentando 3.1 mm. Para la segunda evaluación los tratamientos T4 y T3 fueron estadísticamente iguales, con 14.4 mm y 13.6 mm respectivamente, mientras que el testigo presentó 10.4 mm de diámetro.

Para la variable peso del rábano con follaje, la comparación de medias mostró que el mayor peso lo obtuvo el T4 siendo estadísticamente el mejor tratamiento presentando un valor de 61.0 gr, por su parte el T1 obtuvo 20.2 gr siendo el tratamiento con menor peso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cherlinka, V. (19 de Marzo de 2025). *EOS Data Analytics*. Obtenido de https://eos.com/es/blog/agricultura-organica/
2. Compartido, F. d. (14 de Junio de 2017). *Gobierno de México*. Obtenido de https://www.gob.mx/firco/articulos/importancia-de-los-productos-organicos?idiom=es
3. Díaz, M. F., Pardillo, T. B., & Castillo, R. (10 de Septiembre de 2023). *ResearchGate.* Obtenido de Evaluación de humus de lombriz y estiércol bovino en la producción de rábano (Raphanus sativus L.) en condiciones de organopónico: https://www.researchgate.net/publication/374162604_Evaluacion_de_humus_de_lombriz_y_estiercol_bovino_en_la_produccion_de_rabano_Raphanus_sativus_L_en_condiciones_de_organoponico
4. Félix-Herrán, J. A., Sañudo-Torres, R. R., & Rojo-Martínez, G. E. (enero-abril de 2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai, 4*(1), 57-67. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/461/46140104.pdf
5. Ulibarry, P. G. (Marzo de 2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes.* Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf
6. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (29 de Junio de 2022). *Gobierno de México.* Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737323/8_Elaboracio_n_de_Bocashi.pdf

CONCENTRACIÓN FOLIAR DE ZINC EN PLANTAS DE TRES VARIEDADES DE CHILE (*Capsicum Annuum L.)* EN RESPUESTA AL TRATAMIENTO CON CADMIO

María de la Luz Buendía-Valverde, Fernando Carlos Gómez-Merino, Libia Iris Trejo-Téllez

Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
buendia.luz@colpos.mx

RESUMEN

El zinc (Zn) es un elemento esencial para plantas superiores, requerido en bajas concentraciones. Forma parte estructural de enzimas y proteínas; además, es necesario para la fotosíntesis y para el metabolismo de los ácidos nucleicos y carbohidratos, entre otros. Por otra parte, el Cd es un metal de transición no esencial, tóxico y que se acumula en plantas, con una vida media biológica de más de 20 años, por lo que es considerado un contaminante prioritario. Es absorbido fácilmente por las plantas, ingresa a las células radiculares a través de transportadores regulados por zinc. Dentro de la planta, el Cd puede desencadenar alteraciones a nivel bioquímico, fisiológico y nutrimental. Por lo anterior, se evaluó el efecto que el Cd puede tener en la concentración foliar de Zn en plantas de tres variedades de chile: Jalapeño, Poblano y Serrano. Se estableció un experimento completamente al azar, la unidad experimental fue una planta establecida en bolsa con tezontle como sustrato en condiciones de invernadero, con seis repeticiones por tratamiento, irrigadas con solución nutritiva Steiner. Treinta días después de la siembra, se agregaron a la solución nutritiva los siguientes tratamientos: 0, 5 y 10 µM $CdCl_2$. Transcurridos 80 d de tratamientos se determinó en hojas la concentración foliar de Zn. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba (LSD, $P \leq 0.05$). Los resultados mostraron que el Cd redujo estadísticamente la concentración foliar de Zn en las tres variedades de chile evaluadas, al aplicar 5 y 10 µM $CdCl_2$, con respecto al testigo. Se concluye que la exposición al Cd reduce la concentración foliar de Zn en las tres variedades evaluadas.

INTRODUCCIÓN

El zinc (Zn) es un micronutriente y desempeña un papel indispensable para el crecimiento y metabolismo de las plantas (Jiang *et al*., 2023). En comparación con otros metales como el hierro (Fe) y el cobre (Cu), el Zn posee propiedades particulares que lo colocan como el segundo cofactor metálico más abundante después del Fe, pero altamente versátil en proteínas (enzimas) principalmente en ligasas, isomerasas, oxidorreductasas, hidrolasas, transferasas y liasas (Stanton *et al*., 2022).

La deficiencia de Zn en plantas ocurre en el 30% de los suelos agrícolas a nivel mundial, esta problemática se encuentra directamente relacionada con las deficiencias de Zn en la población humana de estas regiones. Las deficiencias de Zn en plantas llegan a provocar reducción del crecimiento, clorosis y disminución de los rendimientos (Rehman *et al.,* 2018).

Por otra parte, el cadmio (Cd) es un metal de transición no esencial para plantas superiores, es considerado un contaminante ambiental debido a que sus emisiones son provocadas por actividades antropogénicas como la industria minera, metalurgia, entre otras. El Cd junto al arsénico (As), el mercurio (Hg) y plomo (Pb) constituyen los cuatro metales y metaloides más utilizados en la fabricación de productos químicos de mayor preocupación para la salud humana (Clemens, 2019).

Por otra parte, la absorción y transporte de Cd en las plantas ocurre primordialmente a través de transportadores de cationes divalentes (Fe^{2+}, Mn^{2+} y Zn^{2+}), esto se ha evidenciado en plantas de *Arabidopsis*, donde los transportadores de Fe (IRT1) y de Mn (NRAMP1) pueden absorber Cd (Zhao *et al*., 2022).

Los mecanismos de toxicidad del Cd están asociados a la interacción con grupos funcionales en proteínas y la homeostasis de nutrimentos, la similitud con elementos esenciales puede provocar alteración del estatus nutrimental (Clemens, 2019). Asimismo, dentro de la planta, el Cd puede desencadenar alteraciones a nivel bioquímico y fisiológico (Asgher *et al*., 2020).

Obtener cultivos seguros libres de metales no esenciales como el Cd, es uno de los retos de nuestra generación a nivel mundial, estudiar las alteraciones que puede provocar es de suma importancia para entender su comportamiento y toxicidad, por lo anterior, este trabajo evaluó el efecto que el Cd puede tener en la concentración foliar de Zn en plantas de tres variedades de chile: Jalapeño, Poblano y Serrano.

PARTE EXPERIMENTAL

Este trabajo se realizó bajo condiciones de invernadero con temperaturas promedio diurnas y nocturnas de 32 °C y 15 °C, respectivamente; humedad relativa de 31% en el día y 87% en la noche; intensidad luminosa de 137 µmol m^{-2} s^{-1} con un fotoperiodo de 11.5 h. Para llevar a cabo el experimento se germinaron semillas de tres variedades de chile: Jalapeño “Emperador” NUN 70030, Poblano “Capulín” y Serrano “Coloso”, las plántulas sanas de 60 d se trasplantaron en bolsas negras de polietileno con tezontle como sustrato, fueron establecidas bajo un diseño experimental completamente al azar con seis repeticiones por tratamiento, irrigadas mediante solución nutritiva universal Steiner (Steiner, 1984) con la composición química de macronutrimentos en mol_c m^{-3} fue: 12 NO_3^-, 1 $H_2PO_4^-$, 7 SO_4^{2-}, 7 K^+, 9 Ca^{2+}, 4 Mg^{2+}. Las concentraciones de micronutrimentos empleadas en mg L^{-1} fueron: 5 Fe, 2.328 Mn, 0.466 Zn, 0.186 Cu, 0.432 B y 0.173 Mo. La solución nutritiva se formuló con reactivos grado analítico. El riego fue automatizado mediante un sistema por goteo en espagueti que consistió en 8 riegos de 120 mL al día para cada una de las plantas.

Los tratamientos de Cd fueron 0, 5 y 10 µM a partir de cloruro de cadmio ($CdCl_2$, CAS 10108-64-2 Sigma Aldrich; MO, EE. UU.), que fueron suministrados en la solución nutritiva antes descrita. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones, mismas que se distribuyeron en un diseño completamente al azar.

Después de 80 d de tratamiento, las plantas se cosecharon, las hojas se secaron a 70 °C en una estufa de aire forzado (Riossa, modelo HCF-125; Guadalajara, México), se molieron a tamaño de partícula (2 mm) tomando una muestra para el análisis químico. La concentración foliar de Zn se determinó en el extracto resultante de la digestión ácida con HNO_3:$HClO_4$ (2:1, v:v), con un espectrofotómetro de emisión óptica por plasma acoplado (ICP-OES 725-ES; Agilent; Santa Clara, CA, EE. UU.).

A partir de los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (LSD, $P \leq 0.05$) usando el software SAS (SAS, 2011).

RESULTADOS

De acuerdo con Marschner (2012), los datos de concentración foliar de Zn obtenidos en las variedades de chile se encuentran por encima del nivel de suficiencia reportado en plantas. No obstante, la exposición de Cd tuvo efectos negativos en la concentración de Zn en las variedades de chile. En Jalapeño, la aplicación de 5 µM Cd la redujo en 65.5% y con 10 µM disminuye 59%; para Poblano, los tratamientos con Cd provocaron reducciones del 46% en promedio; mientras que en para la variedad Serrano, fueron del 28% con respecto al testigo (**Figura 1**).

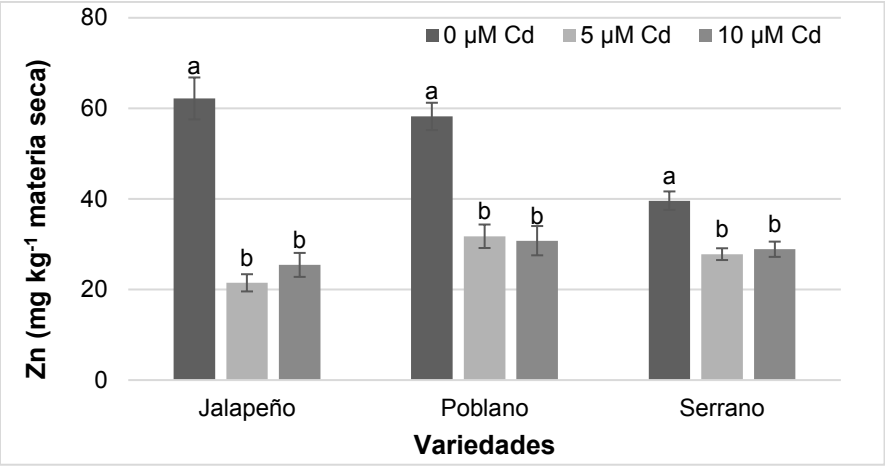


Figura 1. Concentración foliar de Zn en plantas de chile Jalapeño, Poblano y Serrano expuestas a Cd durante 80 d. Medias ± DE con letras distintas en cada variedad indican diferencias estadísticas (LSD, $P \leq 0.05$).

La reducción del Zn en plantas ante la exposición a Cd se ha reportado en plantas de tomate tratadas con 35 µM Cd por 7 d (Borges *et al.*, 2019). De igual manera, las concentraciones de 110 a 190 mg Cd kg^{-1} reducen la concentración de Zn en platas de mostaza (Jiang *et al*., 2004), estos resultados concuerdan con los datos obtenidos en nuestro estudio, contrariamente, en plántulas de papa, los tratamientos de 50 a 200 µM Cd no presentan efectos en la concentración de Zn (Gonçalves *et al.,* 2009).
El Zn y el Cd comparte algunas características químicas como el mismo estado de oxidación (+2) y radio atómico similar (1.38 y 1.54 Å, respectivamente). Debido a esto, se ha planteado la posibilidad de una competencia por los sitios de absorción y transporte entre estos elementos (Przedpełska-Wąsowicz *et al*., 2012; Seshadri *et al*., 2016).

Además, se ha establecido que el Cd puede reemplazar al Zn en proteínas que requieren Zn como cofactor, lo cual podría afectar procesos metabólicos y fisiológicos en las plantas donde sea necesario este micronutrimento (Clemens, 2019).

CONCLUSIONES

El Cd redujo significativamente la concentración foliar de Zn en las tres variedades de chile evaluadas. La variedad Jalapeño presentó la mayor disminución en la concentración de este micronutriente, seguida por Poblano y Serrano. Los resultados sugieren que la exposición al Cd altera la homeostasis nutrimental del Zn, lo que podría afectar procesos fisiológicos dependientes de este elemento esencial.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Steiner, “The universal nutrient solution. 6th international congress on soilless culture. Wageningen, The Netherlands. 1984, pp. 633-650
2. Rehman, M. Farooq, L. Ozturk, A. Muhammad & K. H. M. Siddique, “Zinc nutrition in wheat-based cropping systems”, Plant Soil, Vol. 422, 2018, pp. 283–315.
3. Seshadri, N. S. Bolan, H. Wijesekara, A. Kunhikrishnan, R. Thangarajan, F. Qi, R. Matheyarasu, C. Rocco, M. Kenneth & R. Naidu, “Phosphorus–cadmium interactions in paddy soils”, Geoderma, Vol. 270, 2016, pp. 43–59.
4. Stanton, D. Sanders, U. Krämer, & D. Podar, “Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification”, Mol. Plant, Vol. 15, 1, 2022, pp. 65–85.

5. Przedpełska-Wąsowicz, A. Polatajko, & M. Wierzbicka, “The influence of cadmium stress on the content of mineral nutrients and metal-binding proteins in *Arabidopsis halleri* L.”, Water Air Soil Pollut., Vol. 223, 8, 2012, pp. 5445–5458.
6. J. Zhao, Z. Tang, J. J. Song, X. Y. Huang & P. Wang, “Toxic metals and metalloids: Uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food”, Mol. Plant, Vol. 15, 1, 2022, pp. 27–44.
7. J. F. Gonçalves, F. G. Antes, J. Maldaner, L. B. Pereira, L. A. Tabaldi, R. Rauber, L. V. Rossato, D. A. Bisognin, V. L. Dressler, E. M. M. Flores & F. T. Nicoloso, “Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions”, Plant Physiol. Biochem., Vol. 47, 9, 2009, pp. 814–821.
8. K. L. R. Borges, F. W. R. Hippler, M. E. A. Carvalho, R. S. Nalin, F. I. Matias & R. A. Azevedo, “Nutritional status and root morphology of tomato under Cd-induced stress: comparing contrasting genotypes for metal-tolerance”, Sci. Hortic., Vol. 246, 2019, pp. 518–527.
9. M. Asgher, M. I. R. Khan, N. A. Anjum, & N. A. Khan, “Minimising toxicity of cadmium in plants–role of plant growth regulators”, Protoplasma, Vol. 252, 2020, pp. 399–413.
10. P. Marschner, “Marschner´s mineral nutrition of higher plants”. Third edition. Academic press., 2012, USA. 649 p.
11. SAS Institute Inc. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., 2011, Cary, N. C., USA.
12. S. Clemens, “Safer food through plant science: reducing toxic element accumulation in crops”, J. Exp. Bot., Vol. 70, 20, 2019, pp. 5537–5557.
13. X. J. Jiang, Y. M. Luo, Q. Liu, S. L. Liu & Q. G. Zhao, “Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian mustard”, Environ. Geochem. Health, Vol. 26, 2004, pp 319–324.
14. Y. Jiang, C. Wei, Q. Jiao, G. Li, M. N. Alyemeni, P. Ahmad, T. Shah, S. Fahad, J. Zhang, Y. Zhao, F. Liu, S. Liu & H. Liu, “Interactive effect of silicon and zinc on cadmium toxicity alleviation in wheat plants”, J. Hazard. Mater., Vol. 458, 131933, 2023.

ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREVIOS INTERNACIONALES RELACIONADOS CON LA CONSOLIDACIÓN DE MADERA PATRIMONIAL CON ATAQUE XILÓFAGO Y SU CARACTERIZACIÓN FISICO-MECÁNICA

Geovanna Marianne Ochoa Manzo, Mayra Irery Carrillo Gómez y Pablo López Albarrán

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
2570742c@umich.mx

RESUMEN

La madera has sido ampliamente utilizada para la elaboración de objetos de uso diario o artísticos desde inicios del asentamiento del hombre, siendo parte de su historia y conformando parte del patrimonio cultural de distintos países. Estos bienes al ser de material orgánico tienden a ser propensos al ataque de insectos xilófagos, ocasionando pérdida de material, y poniendo en riesgo la estabilidad y la conservación de los bienes patrimoniales a largo plazo. Por consiguiente, distintos especialistas en el ámbito de preservación del patrimonio cultural han implementado diferentes procesos de restauración para estabilizar los objetos de madera dañados. En este sentido, la metodología más recurrente suele ser la consolidación, mediante la que se busca propiciar la recuperación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera, principalmente en cuanto a su resistencia.

La consolidación suele consistir en la aplicación de adhesivos naturales o sintéticos mediante la impregnación de la madera ya sea por inmersión o inyección dependiendo del tipo de objeto y la interacción que puede tener con otros materiales que conforman al mismo. La aplicación de consolidantes se suele evaluar de manera empírica por especialistas del campo, pero existen varios estudios que han buscado comprender de manera experimental la interacción de los adhesivos aplicados con la madera y su modificación de propiedades, principalmente en cuanto a dureza y resistencia, mediante técnicas poco invasivas y no destructivas al tratarse de bienes patrimoniales.

Por consiguiente, como primer acercamiento para establecer una metodología de consolidación y caracterización adecuada para madera policromada con ataque xilófago, se planteó una investigación bibliográfica sistemática e integrativa, así como una investigación documental para la comparación de los ensayos más recientes relacionados a la consolidación de madera patrimonial con ataque xilófago a partir de una matriz comparativa y una tabla de operacionalización. Los resultados arrojaron a nivel internacional, el uso de adhesivos sintéticos tradicionales como Polivinil metacrilato (PVA), así como la experimentación del uso de éteres de celulosa como Hidroxipropil celulosa (HPC). En cuanto a la metodología de aplicación destaca el uso de inmersión. La evaluación de la modificación de características físico-mecánicas arroja el uso de microscopia electrónica de barrido (SEM), dinamómetro, y ultrasonido. Estos resultados permitieron comparar los ensayos de consolidación que se han implementado a nivel internacional en madera patrimonial para establecer las variables de aplicación y evaluación en torno a la consolidación de madera policromada con ataque xilófago como parte de la segunda etapa de experimentación.

INTRODUCCIÓN

Se denomina patrimonio cultural a aquellos “objetos que la sociedad atribuye un particular valor artístico, histórico, documental, estético, científico (…) que constituyen una herencia material y cultural del pasado para las generaciones venideras” (INAH, 1998, p.9). Su entendimiento y clasificación se puede abordar desde distintos aspectos, pero en esta ocasión nos centraremos en su materialidad, es decir, de los materiales que constituyen al objeto o bien cultural. En este sentido, en el presente escrito, nos enfocaremos en aquellos cuyo soporte es madera.

La madera es un material vegetal proveniente del tronco de los árboles, compuesto por células vegetales y compuestos químicos como celulosa, hemicelulosa y lignina. Por consiguiente, es un material ampliamente sensible a agentes de deterioro abióticos, como la humedad relativa y la

temperatura, que cuando se encuentran en parámetros altos pueden acrecentar a los agentes bióticos como hongos e insectos xilófagos. Los insectos xilófagos, tanto las larvas como adultos, son aquellos cuya actividad alimentaria consiste en madera, reduciendo de manera mecánica y química la densidad del material vegetal (J.L. Yela, 1997, p.112), lo cual puede llegar a comprometer su estabilidad estructural. La presencia del insecto suele identificarse mediante la observación de orificios de salida, galerías y desechos similares a aserrín.

En este sentido, cuando un bien cultural con soporte de madera suele exhibir un ataque por insectos xilófagos o una degradación, especialistas en el área denominados restauradores o conservadores, llevan a cabo distintas acciones de intervención para asegurar su estabilización material y buscar su conservación a largo plazo. Por consiguiente, dependiendo del diagnostico previo del objeto en relación con su contexto, materiales y nivel de degradación, se suelen aplicar prácticas de consolidación, las cuales consisten en "devolver la cohesión o consistencia a los materiales (…) a partir de la aplicación de productos adhesivos por impregnación, pulverización, goteo, inyección, inmersión" (A. Calvo, 1997, p.64).

Los materiales utilizados para el proceso de consolidación de madera, así como las metodologías de aplicación se han ido modificando a partir de la época, contextos, ensayos de nuevos materiales, así como por prueba y error en la práctica diaria, proporcionando así un amplio panorama de referencia para la toma de decisiones al momento de buscar estabilizar madera degradada. Por otro lado, la evaluación de los resultados obtenidos a partir de la consolidación se enfoca en la modificación de las características de la madera principalmente en su dureza, resistencia, brillo y color. Estos cambios suelen medirse a partir de la observación organoléptica o a partir de técnicas analíticas poco invasivas y no destructivas al tratarse de bienes patrimoniales únicos de gran valor material e inmaterial.

Por ende, como fase preliminar de la investigación enfocada a la consolidación de madera patrimonial degradada, se realizó un análisis comparativo de ensayos experimentales sobre las últimas prácticas de consolidación de madera patrimonial con ataque xilófago. Lo anterior con la finalidad de plantear un panorama completo y realizar una comparación de los ensayos más recientes.



Figura 1. Imagen ilustrativa que representa la madera atacada con insectos xilófagos y su consolidación con adhesivos sintéticos. A su alrededor se observa de izquierda a derecha los adhesivos de PMMA, PVB. Generada con IA (2026).

PARTE EXPERIMENTAL

Siguiendo el objetivo planteado en la introducción, se realizó un análisis comparativo de ensayos experimentales sobre las últimas prácticas de consolidación de madera patrimonial con ataque xilófago. Este análisis se dividió en tres etapas:

Primera etapa: Se llevó a cabo una investigación bibliográfica sistemática e integrativa, así como una investigación documental en bases de datos especializadas y *journals* enfocados al patrimonio cultural.
Segunda etapa: Posteriormente se identificaron los documentos relacionados a la consolidación de madera patrimonial degradada y se dividieron por enfoque en: madera anegada (arqueológica), madera con degradación por el tiempo o agentes biológicos, y madera con ataque xilófago.
Tercera etapa: Una vez identificados los documentos encontrados durante la investigación, se realizó un análisis de la información reportada por documento a partir de una tabla comparativa y de operacionalización enfocándonos en: consolidante utilizado, metodología de aplicación del consolidante, características evaluadas, y técnicas analíticas aplicadas,

RESULTADOS

Conforme a las tres etapas de la investigación, a continuación, se presentan los resultados encontrados:
Primera etapa: Se encontró un universo de 40 documentos entre reportes de conferencias, libros y artículos enfocados a la intervención de bienes de madera patrimonial, así como de adhesivos aplicados en el ámbito.
Segunda etapa: Del 100% de los documentos encontrados, se identificaron el 62.5% directamente correlacionados a la consolidación de madera y se dividieron en los tres enfoques determinados tal como lo muestra la gráfica de la figura 2.

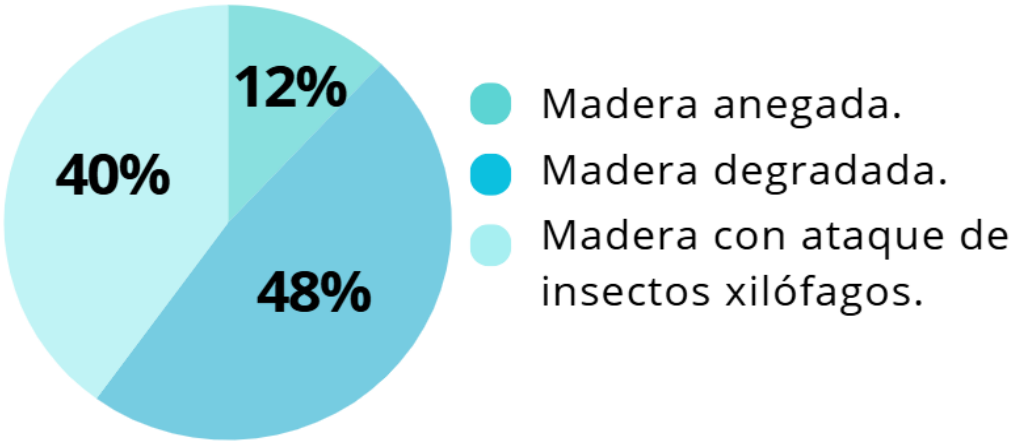


Figura 2. Gráfica de clasificación de enfoque del 62.5% de los documentos correlacionados con consolidación de madera patrimonial.

Tercera etapa: Se procedió a analizar y comparar los documentos correspondientes al enfoque de madera con ataque xilófago, los cuales arrojaron los siguientes datos en la tabla 1 conforme a los datos establecidos.

Tabla 1. Comparativa de los ensayos enfocados en consolidación de madera con ataque xilófago.

Autor	Consolidante	Metodología de aplicación	Caracteristicas evaluadas	Técnicas analíticas aplicadas
M.A. Pereira, et al. (2026)	Resina de poliéster insaturado y de baja reactividad (LP8847) con monóneros de metacrilato.	Impregnación por inmersión.	• Estabilidad térmica. • Degradación de masa. • Cristalinidad. • Penetración.	• Calorimetríca diferencial de barrido. • FTIR. • SEM. • MO.
C.S. Ionescu, et al (2021)	Paraloid B72 al 12% en acetato de etilo y tolueno (1:1).	Impregnación por inmersión.	• Dureza. • Densidad.	• Dinanómetro.
V. Moise, et al. (2019)	Resina de poliéster acrilato.	Impregnación al vacio por presión con gas nitrógeno + radiación.	• Estabilidad química y térmica. • Cambios dimensionales. • Color. • Masa.	• Espectrofotometría UV-VIS. • Calorimetría diferencial de barrido. • Micrometría.
K. E. Spirydowicz, et al. (2001)	Butvar B-98 diluida en etanol-tolueno (60:40) en concentraciones entre 5% y 15%.	Impregnación por inmersión.	• Penetración. • Dureza. • Color. • Alteraciones químicas.	• SEM. • Penetración por aguja. • FTIR. • Colorímetro.
A. Avram, et. al. (2022)	Paraloid B72 al 10% en acetato de etilo.	Impregnación por inmersión.	• Densidad. • Dureza.	• Penetrómetro digital. • Balanza analítica.
P.V. Alfiere, et al. (2018)	Siloxanos al 50% con aceite de lino y trementina de venecia.	Aplicación con brocha.	• Estabilidad dimensional. • Hidrofobicidad. • Mejora de apariencia estética.	• Microscopio óptico + instrumentos de medición. • Bascula granataria.
M. Cutrubinis, et al. (2010)	Resina de poliéster insaturado con estireno.	Impregnación por inmersión + Radiación Gamma.	• Color. • Resistencia a la penetración. • Flexión. • Impacto.	• Espectrofotometría. • Pruebas mecánicas.

Tabla 2. Comparativa de los ensayos enfocados en consolidación de madera con ataque xilófago.

Autor	Consolidante	Metodología de aplicación	Caracteristicas evaluadas	Técnicas analíticas aplicadas
J.E. Benitez Telles, et al. (2008)	• Polimetil metacrilato (MMA o Paraloid B72) al 20% en acetona. • Polivinil butiral (PVB o Butvar B98) al 16.75% en etanol-tolueno (40:60).	Impregnación por inmersión al vacío.	• Densidad. • MOE.	• Báscula. • Técnica de exitación por impulso.
A. Fornari, et al. (2024)	Nanocelulosa cristalina (CNC) .	Aplicación mediante brocha.	• Peso. • Color. • Morfología. • Penetrabilidad.	• Báscula. • Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), • Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). • Colorimetría. • Microscopía de luz reflejada.
C. R. Carvalho, et al. (2021)	• Laropal A81 al 10% en alcohol etílico e isopropílico. • Paraloid B72 al 10% en atanoato de butilo. • Regaldez 1126 al 10% en ciclohexano.	Aplicación mediante jeringa y brocha.	• Retención. • Penetración. • Cambios morfológicos. • Brillo.	• Microscópio óptico (MO). • FTIR. • Microscopía Electrónica de Barrido por Emisión de Campo (FESEM).

Posteriormente la información comparada se cuantifico conforme a frecuencia y se graficó por porcentajes dentro del universo de los ensayos comparados (tabla 1), tal como lo indican las figuras 3, 4 y 5.

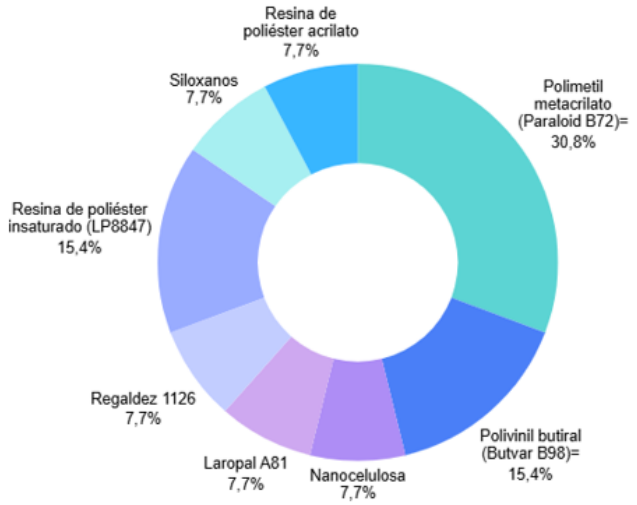


Figura 3. Gráfica de consolidantes, donde se muestra el universo de consolidantes ensayados y su porcentaje de repetición de ensayos.

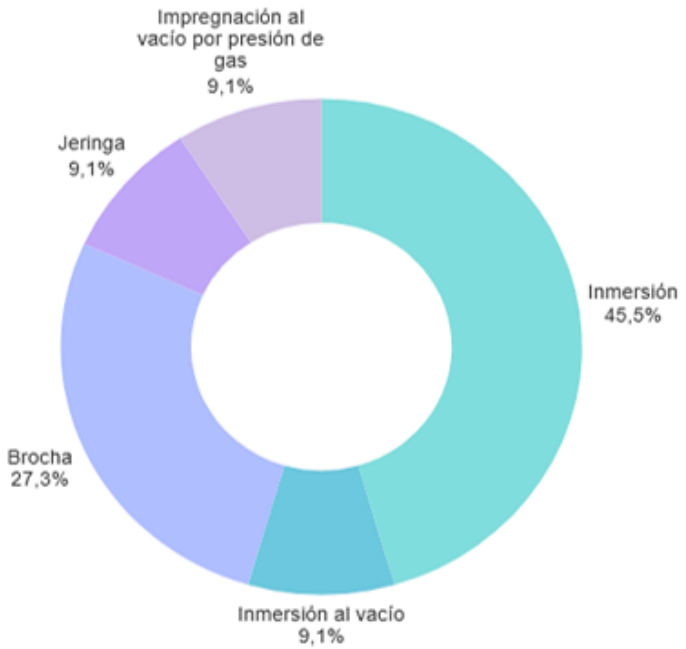


Figura 4. Gráfica de metodología de aplicación de consolidantes, donde se muestra el universo de metodologías ensayadas y su porcentaje de repetición.

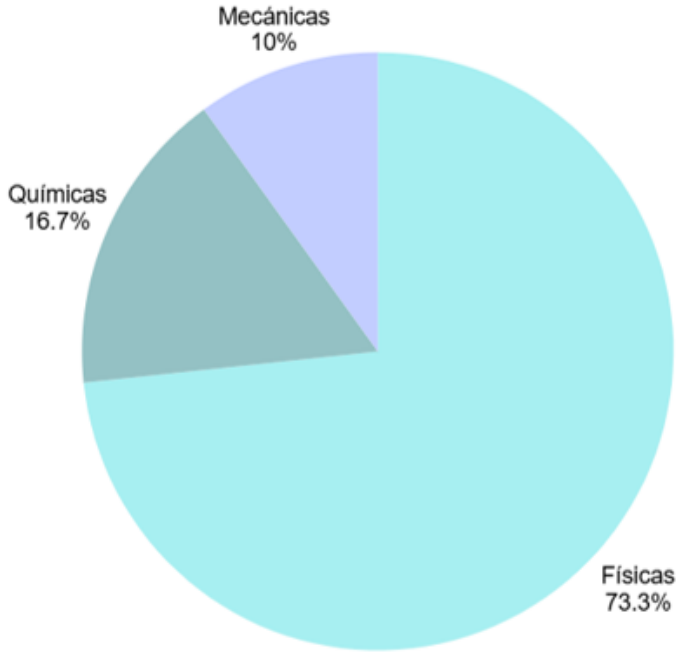


Figura 5. Gráfica de la frecuencia de la medición de características físicas, químicas y mecánicas en el universo de ensayos comparados.

CONCLUSIONES

Conforme a los resultados reportados tenemos que nuestro universo de análisis comparativo consistió en el 40% de los ensayos correspondientes a madera con ataque de insectos xilófagos, dentro de los cuales podemos puntualizar lo siguiente:

Conforme lo indica la figura 3. se encontró un universo de ocho tipos de consolidantes de naturaleza sintética, siendo el más ensayado para verificar o comparar su eficacia y funcionamiento el Polimetil metacrilato, comercialmente conocido como Paraloid B72.

Por otro lado, la gráfica de consolidantes (figura 3) nos arroja que en los últimos años se están probando nuevos materiales como la nanocelulosa, Regaldez 1126, siloxanos y resinas de poliéster acrilato.

En cuanto a la metodología de aplicación, los resultados de la gráfica en la figura 4 nos arroja la impregnación por inmersión como la más utilizada, dado el caso de que se trata de probetas de menor tamaño lo cual permite controlar los tiempos, condiciones y el nivel de penetración del consolidante.

Por último, tenemos una amplia variedad de técnicas analíticas aplicadas para la caracterización de la madera con ataque de insecto xilófago antes y después de la consolidación, predominando la medición de características físicas tal como indica la gráfica de la figura 5.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alfieri, P. V., Lofeudo, R., Canosa, G., Iloro, F., & Traversa, L. P. (2018). Conservation of a wooden tomb-marker from the Jewish cemetery of Algarrobos in Argentina. *Heritage, 1*(1), 47–56. https://doi.org/10.3390/heritage1010005
2. Avram, A., Ionescu, C., & Lunguleasa, A. (2022). Some methods for the degradation-fragility degree determination and for the consolidation treatments with Paraloid B72 of wood panels from icon-type heritage objects. *Forests, 13*(5), 801. https://doi.org/10.3390/f13050801
3. Benítez Telles, J. E., Oliver Villanueva, J. V., Ibiza Palacios, S., Martínez Ruiz, G., Grafiá Sales, J. V., & Vivancos Ramón, M. V. (2008). Valoración de los tratamientos de consolidación de madera deteriorada comparando los valores de módulo de elasticidad antes y después de los tratamientos. *Arché, 3*, 97–102. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6910335&info=resumen&idioma=ENG
4. Calvo, A. (1997). *Conservación y restauración: Materiales, técnicas y procedimientos de la A a la Z*. Ediciones del Serbal.
5. Carvalho, C. R., Cortina, L. O., Araújo, M. E., Pérez-Marín, E., & Bailão, A. M. (2021). Study on the impregnation of Laropal A81 to consolidate the wood support in easel paintings. *International Journal of Conservation Science, 12*(3), 869–878.
6. Cutrubinis, M., Tran, K., Bratu, E., Caillat, L., Negut, D., & Niculescu, G. (2010). Disinfection and consolidation by irradiation of wooden samples from three Romanian churches. En J. Grill (Ed.), *Wood science for conservation of cultural heritage: Braga 2008* (pp. 81–87). Firenze University Press. http://digital.casalini.it/9788864531656
7. Fornari, A., Rocco, D., Mattiello, L., Bortolami, M., Rossi, M., Bergamonti, L., Graiff, C., Bani, S., Morresi, F., & Pandolfi, F. (2024). Comparative studies on nanocellulose as a bio-based consolidating agent for ancient wood. *Applied Sciences, 14*(17). https://doi.org/10.3390/app14177964
8. Instituto Nacional de Antropología e Historia. (1998). *Código de ética y normas prácticas para la profesión de la restauración para el patrimonio cultural de México* (pp. 6–30). INAH.
9. Ionescu, C. Ş., Lunguleasa, A., Avram, A., & Spîrchez, C. (2021). Evaluation of the efficiency of the consolidation treatment with Paraloid B72 performed on artworks with degraded wood support. *MATEC Web of Conferences, 343*, 02001. https://doi.org/10.1051/matecconf/202134302001

10. Moise, V., Stanculescu, I., Vasilca, S., Cutrubinis, M., Pincu, E., Oancea, P., Raducan, A., & Meltzer, V. (2019). Consolidation of very degraded cultural heritage wood artefacts using radiation curing of polyester resins. *Radiation Physics and Chemistry, 156*, 314–319. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.11.028
11. Pereira, M. A. M. G., Oliveira, M. J. A., Otubo, L., Lima, L. M. P. R., & Salvador Vasquez, P. A. (2026). Gamma radiation cured polyester resin for restoration of cultural heritage wood. *Applied Radiation and Isotopes, 229*. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.112404
12. Spirydowicz, K. E., Simpson, E., Blanchette, R. A., Schniewind, A. P., Toutloff, M. K., & Murray, A. (2001). Alvar and Butvar: The use of polyvinyl acetal resins for the treatment of wooden artifacts from Gordion, Turkey. *Journal of the American Institute for Conservation, 40*(1), 43–57.
13. Yela, J. L. (1997). Insectos que causan daños al patrimonio histórico y cultural. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa, 20*, 111–122.

APLICACIÓN DE RIZOBACTERIAS EN PLANTAS DE ZINNIA ELEGANCE

Blanca Estela Gómez Luna, Vania Sararí Gómez Torrez, Adán Topiltzin Morales Vargas

Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra, Ingeniería en Biotecnología.
be.gomez@ugto.mx

RESUMEN

Los biofertilizantes, constituidos por consorcios de microorganismos benéficos como las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés), han adquirido creciente relevancia en la agricultura moderna y sostenible. Estos microorganismos desempeñan funciones esenciales que contribuyen a mejorar la nutrición vegetal, incluyendo la solubilización y fijación de nutrientes, la producción de fitohormonas y la inducción de mecanismos de defensa en las plantas. Asimismo, los biofertilizantes favorecen la restauración y el mantenimiento de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, promoviendo una mayor biodiversidad microbiana y, en consecuencia, un medio ambiente más saludable y fértil. En este estudio se evaluó el efecto de la inoculación con diversas rizobacterias sobre la germinación de semillas de *Zinnia elegans*, una planta de alto valor ornamental, con el objetivo de demostrar el potencial funcional de las rizobacterias como biofertilizantes efectivos. Las semillas fueron inoculadas con cultivos bacterianos y sometidas a condiciones controladas de humedad y temperatura, evaluándose parámetros como la tasa de germinación y la altura del tallo. Los resultados del análisis de varianza mostraron que los tratamientos con dos de los distintos aislados bacterianos presentaron diferencias significativas en comparación con el control, destacando mejoras en el desarrollo general de la planta.

INTRODUCCIÓN

Biofertilizantes y plantas ornamentales

Los jardines son zonas de terreno donde se cultivan flores, árboles y otras plantas con fines ornamentales, comerciales o educativos estás áreas con toda su vegetación y su biodiversidad tiene varios usos antropocéntricos. El acelerado desarrollo urbano ha reducido gradualmente la superficie de estos espacios, limitando áreas de esparcimiento. Tanto los jardines públicos como los privados se ven afectados por enfermedades de las plantas, el uso de agroquímicos, los efectos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad. En ocasiones la población pierde el valor de los espacios verdes, sin embargo, presentan beneficios ecológicos como purificación del aire, reservorio de aves e insectos, amortiguan la contaminación acústica y visual, son espacios de esparcimiento y convivencia familiar (Mendoza-García *et al*., 2011).

Existen plantas a las que se les nombra como ornamentales que por sus cualidades son usadas para decorar y adornar nuestro entorno. En México se encuentran numerosas especies ornamentales, tanto nativas como exóticas, muchas de las cuales son reconocidas únicamente a nivel regional. Se estima que existen aproximadamente 4,220 especies con potencial ornamental, de las cuales 3,434 son nativas y 786 introducidas (Nava-Esparza *et al*., 2006).

El valor ornamental o la cualidad estética de estas especies está determinado por diversos atributos, como la forma o estructura general de la planta, las características del follaje (color, densidad), las flores (color, fragancia, morfología y tamaño) y los frutos (color y tamaño). Estas características pueden manifestarse de manera estacional, por ejemplo, durante la época de floración, o mantenerse a lo largo de todo el ciclo de vida de la planta, como ocurre con aquellas de hojas decorativas. Estas especies juegan un papel importante en México, desde los tiempos prehispánicos; donde se utilizaban para huertos familiares y ceremonias, siendo indicio de la importancia de la floricultura en el país (Pulido *et al*., 1988).

Las plantas ornamentales provienen de distintos ambientes, lo que influye en su adaptación a nuevos lugares. En las selvas secas destaca la flor de mayo (*Plumeria rubra*), apreciada por sus flores de colores variados y su fragancia. En las selvas húmedas sobresale la palma camedor (*Chamaedorea* spp.) por su follaje, ampliamente utilizado en arreglos florales. En los bosques de niebla se valoran especies como el yoloxóchitl (*Magnolia mexicana*), la magnolia (*Magnolia dealbata*) y las orquídeas (*Stanhopea spp*.), todas con flores grandes, vistosas y aromáticas (Linares *et al*., 2006).

Otro ejemplo es *Zinnia elegans* (*Zinnia violacea*) es una planta ornamental que pertenece a la familia Asteraceae, que es la más diversa de los angioespermas, cifras recientes indican que existen 25,000-30,000 especies, las cuales equivalen a 10% de las plantas con flor conocidas en todo el mundo (Mandel *et al*., 2019). México posee un poco más de la décima parte, al registrarse 3127 especies, de las cuales 3065 son nativas (Redonda-Martínez, 2022). La planta Zinnia es cultivada en su mayoría por su amplia gama de colores, su floración persistente. Al momento de iniciar su germinación, no se tienen complicaciones y es capaz de adaptarse a las duras condiciones del paisaje, por lo que ha sido estudiada por sus valiosos metabolitos secundarios: saponinas, flavonoides, polifenoles, esteroides y glucósidos (Burlec, 2019).

La temperatura influye de manera significativa en el desarrollo de los botones florales, los cuales se forman más lentamente a temperaturas bajas (CONABIO, 2009). Este factor ambiental es determinante para el crecimiento y la calidad de las plantas ornamentales, cuya producción no solo tiene un valor estético, sino también económico y social.



Figura 1. Plantas ornamentales en México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2020.

La aplicación de biofertilizantes para la mejora de la producción vegetal se ha centrado en plantas de importancia agronómica especialmente las que son base de la alimentación mundial como es maíz, frijol, arroz y papa, sin embargo, es necesario ampliar la investigación y aplicación también a las plantas ornamentales en jardines y viveros. La incorporación de microorganismos benéficos, como las rizobacterias, en los procesos de producción y desarrollo de plantas ornamentales representa una alternativa biotecnológica sustentable que mejora la eficiencia fisiológica de las plantas, disminuye el uso de agroquímicos y favorece un manejo ambientalmente responsable.

Por lo que las áreas naturales protegidas constituyen un recurso de alto valor ecológico, debido a que albergan una gran cantidad de diversidad de organismos en sus suelos, incluidos los microorganismos benéficos. Estas áreas, consideradas sistemas ecológicos complejos, mantienen interacciones funcionales entre sus componentes bióticos y abióticos, generando ciclos biogeoquímicos que contribuyen a la estabilidad ambiental y a la conservación de la biodiversidad. El estado de Guanajuato ha determinado y declarado a diversos territorios como Áreas Naturales Protegidas para asegurar el aprovechamiento sustentable y la disponibilidad de los recursos naturales del estado. A partir del año de 1997 se ha venido haciendo la declaratoria y manejo de las Áreas Naturales Protegidas por parte del ejecutivo del estado. Por este motivo es necesario estudiar estos recursos naturales debido a la posibilidad que tienen de alojar una gran variedad de

microorganismos con potencial biotecnológico, como lo son algunos tipos de bacterias las cuales puedan otorgar algún beneficio para el crecimiento vegetal (IEEG, 2018).

Las rizobacterias benefician a las plantas a través de diferentes mecanismos (Figura 2) como: fijación de nitrógeno, síntesis de fitohormonas, desarrollo del crecimiento de la raíz, proliferación de pelos radiculares, mejora de la absorción de nutrientes y agua, inhibición del crecimiento de microorganismos patógenos y producción de sideróforos (Torriente, 2010). Además, participan en el reciclaje tomando nutrientes no aprovechables para la planta y transformándolas hasta la obtención de formas asimilables para las células vegetales (Camelo *et al*., 2011). Así mismo favorecen el desarrollo de otros microorganismos benéficos, promueven la descomposición de sustancias toxicas y aumentan el contenido de materia orgánica (Reséndez *et al*., 2018).

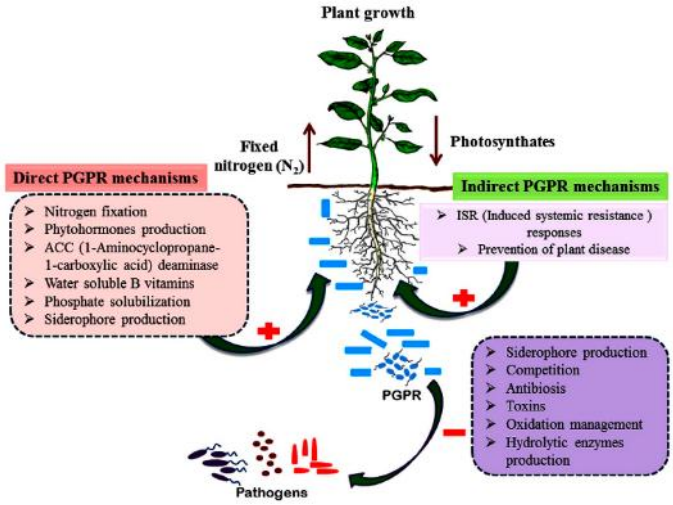


Figura 2. Mecanismos de actividad de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, Chandran *et al*., 2021.

El éxito en la producción de plantas ornamentales depende fundamentalmente de una germinación eficiente y homogénea, así como del vigor de las plántulas, aspectos que pueden verse limitados por factores como la calidad de la semilla, las condiciones del suelo y la incidencia de patógenos. Las rizobacterias ofrecen una alternativa ecológica y eficaz para mejorar estos procesos, gracias a su capacidad para sintetizar fitohormonas, movilizar nutrientes, inducir mecanismos de defensa en la planta y protegerla frente a enfermedades (Chandran *et al*., 2021).

El empleo de las rizobacterias en la propagación de plantas ornamentales no solo favorece la calidad y el crecimiento inicial de las plántulas, sino que también disminuye la dependencia de insumos químicos, lo que resulta ambientalmente responsable y económicamente atractivo. Por esta razón, estudiar y promover el uso de rizobacterias en la germinación de semillas ornamentales es de gran importancia para el desarrollo de prácticas más sostenibles y eficientes en la horticultura ornamental. En este estudio se busca evaluar el efecto de la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento sobre la germinación y el desarrollo inicial de plantas ornamentales, destacando sus mecanismos de acción y su potencial como herramienta biotecnológica para mejorar la calidad y uniformidad de las plántulas.

PARTE EXPERIMENTAL

La investigación se desarrolló en el laboratorio de investigación en Biotecnología de la Universidad de Guanajuato, Campus Celaya - Salvatierra, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, sede Mutualismo. Se emplearon cepas de rizobacterias de una colección generada en trabajos previos, los aislados se obtuvieron de suelo de la ANP "El Cerro de Culiacán", localizado entre los municipios de Cortázar, Jaral del Progreso y Salvatierra y semillas de diversas plantas ornamentales.

Los aislados de las rizobacterias seleccionadas fueron: 313,116, 265, 302, 112, 318 y 317. Estos aislados han demostrado en estudios previos un efecto benéfico sobre la germinación de semillas y el desarrollo inicial de las plántulas. Las rizobacterias fueron inoculadas en 5 mL de caldo de extracto de papa y dextrosa en tubos estériles, posteriormente se incubaron a una temperatura de 28 °C durante 48 horas, bajo agitación constante a 150 rpm, con el objetivo de asegurar un crecimiento de densidad celular de mínimo $1X10^6$ células por mL. Se emplearon semillas de *Zinnia elegans* marca Vita con alto valor ornamental y amplia aceptación en el mercado.

Germinación
Inicialmente, se colocaron 25 semillas de *Zinnia elegans* en el cultivo bacteriano de 48 h y densidad celular de $1x10^6$ células/mL, correspondiente a cada uno de los aislados evaluadas, así como un tratamiento control sin inoculación y se incubaron durante 40 minutos a 150 rpm. Se dispusieron las semillas por tratamiento en cámaras húmedas, cajas Petri de vidrio con papel estéril humedecido, incubadas a 28–30 °C, donde cada tratamiento se aplicó por triplicado. Las semillas fueron monitoreadas cada 24 horas durante una semana. Se contaron las semillas germinadas y se obtuvo el porcentaje de germinación. Las semillas germinadas fueron posteriormente transferidas a charolas de plástico Floramundo, con 72 cavidades color negro con las siguientes medidas 6 x 53.5 x 27 cm. de germinación con sustrato, tierra preparada para jardín de la marca VIGORO, para su desarrollo inicial. Las plántulas desarrolladas en la charola se pasaron a maceta, en el trasplante se inoculó nuevamente con la misma cepa en el sustrato cerca de la raíz principal.

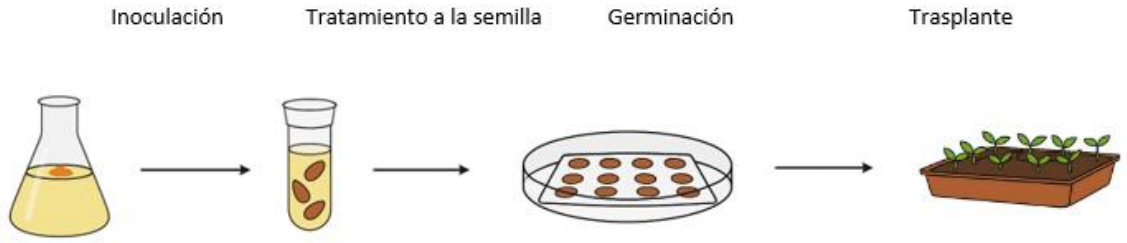


Figura 3. Inoculación y germinación.

Análisis de germinación
Para obtener el porcentaje se utilizó la siguiente formula PG=n/N x 100
Donde n es igual al número de semillas germinadas y N el número total de semillas incubadas
Efecto de la inoculación de rizobacterias sobre longitud de las raíces y el peso de las plántulas.

Se determinó la longitud de los tallos. Para estas mediciones, se capturaron imágenes digitales de las plántulas y se procesaron mediante el software ImageJ. Las imágenes fueron calibradas con escala métrica, lo que permitió la relación de pixeles a unidades reales de medición. Las plántulas fueron cuidadosamente extraídas del sustrato para ser pesadas en una balanza analítica, después de 5 semanas de crecimiento, se dejaron secar 24 horas. Se determinó el peso fresco, el peso seco y porcentaje de humedad.

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar y para el análisis de las variables se utilizó ANOVA y prueba de Tukey.

RESULTADOS

En las pruebas de germinación se observaron en el caso de las plántulas de Zinnia elegans, que las rizobacterias tuvieron un efecto positivo 72 horas después de la inoculación. La información del proveedor de las semillas indicó que el tiempo de germinación de las semillas de Zinnia elegans podían tardar de 10 a 14 días para germinar y otros autores como Riaz (2008), mencionan que la germinación de esta planta en sustratos enriquecidos con fertilizantes sucede de 5 a 7 días. En la figura 4 se puede observar que las rizobacterias que promovieron mejor la germinación fueron 116, 302 y 112.

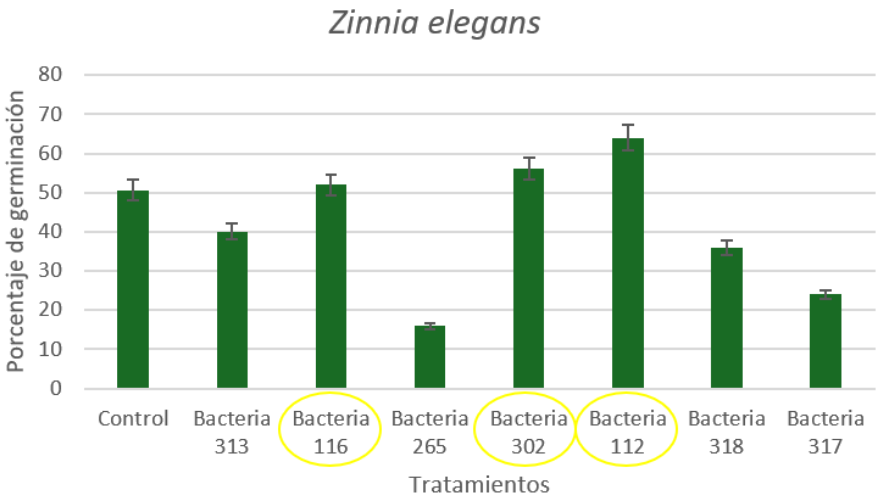


Figura 4. Porcentaje de germinación en *Zinnia elegans*

Durante el proceso de germinación, en las primeras 48 horas de la inoculación, hubo una cantidad de semillas germinadas de *Zinnia* mayor en el control, sin embargo, en los días posteriores, las semillas que fueron tratadas con rizobacterias tenían un porcentaje más alto y ya con efectos positivos visibles, como la formación de los vellos radiculares Figuras 5 y 6.





Figura 5. *Zinnia elegans* aislado 313 a las 72 horas. Figura 6. *Zinnia elegans* control a las 72 horas

Los resultados de humedad reflejan el estado hídrico de las plantas y su capacidad de retener agua, lo que se relaciona directamente con la acumulación de biomasa, ya que un adecuado contenido de agua favorece el crecimiento y la producción de tejidos, tal como indica Larcher (2003). Al obtener los siguientes datos se puede observar que el porcentaje de humedad en los tratamientos con los aislados son más altos respecto al control, teniendo una menor cantidad de biomasa. El elevado contenido de humedad puede estar asociado a la fase temprana de las plántulas de *Zinnia* y al efecto de las rizobacterias (Tabla 1).

Estos resultados evidencian que la respuesta fisiológica varía según la cepa bacteriana empleada, resaltando la importancia de seleccionar inoculantes eficientes para favorecer la acumulación de biomasa. Retana (2025) reportó que, bajo condiciones de 26 °C y exposición solar continua, las plantas alcanzaron alturas máximas de 15 cm en un mes. En contraste, en el presente estudio las

plántulas mostraron mayores alturas, lo que sugiere que las condiciones experimentales y la interacción con las cepas bacterianas favorecieron un crecimiento más acelerado.

Tabla 1. Datos de peso, contenido de humedad y altura en plántulas de *Zinnia elegans*

Tratamiento	Altura (cm)	Peso húmedo(g)	Peso seco(g)	% de Agua
Control	21.08 b	0.19 a	0.06 a	68.42 a
313	24.42 b	0.29 b	0.12 b	68.62 a
116	23.07 b	0.26 b	0.09 b	66.25 a
265	16.617 b	0.22 a	0.05 a	77.27 b
302	6.99 a	0.23 a	0.05 a	78.87 b
112	10.30 a	0.2 a	0.03 a	85 b
318	11.95 a	0.17 a	0.02 a	88.23 b
317	7.68 a	0.14 a	0.02 a	85.71 b

Los valores son promedio de tres mediciones, las letras diferentes en la misma columna indican diferencia entre tratamientos. El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$), indicando que las distintas bacterias influyeron de manera diferente en la variable evaluada.

Si bien algunos tratamientos no superaron al control, se observaron tendencias que sugieren un posible efecto positivo de la inoculación microbiana en el desarrollo general de las plantas. Esto indica que las cepas utilizadas podrían estar favoreciendo procesos fisiológicos asociados al crecimiento y desarrollo de la planta (raíz) y aún requiere más tiempo el experimento para apreciar los efectos benéficos de las rizobacterias, Figura 7. Por lo tanto, impacto de los tratamientos debe interpretarse de forma integral.



Figura 7. Raíces de las plántulas de *Zinnia elegans*

CONCLUSIONES

Las plantas ornamentales, como *Zinnia elegans*, no solo aportan valor estético al paisaje, sino que también constituyen una parte del sector agrícola de alto impacto económico, ecológico y social. Su cultivo puede optimizarse mediante prácticas sostenibles, como la inoculación con rizobacterias. En el presente estudio, la aplicación de estas bacterias mostró efectos significativos en comparación con el control. En particular, los aislados 313 y 116 favorecieron una mayor altura y biomasa. La inoculación microbiana contribuyó de manera positiva a otros aspectos del crecimiento, como la formación de un mayor número de raíces, sugiriendo que las rizobacterias pueden fortalecer la estructura y el desarrollo general de las plantas.

Considerando la creciente necesidad de espacios verdes en nuestro entorno, el uso de plantas ornamentales con una alta capacidad de crecimiento y adaptación al ambiente puede contribuir notablemente a la mejora del paisaje y el bienestar social. Por lo que la producción de plantas con mayor calidad mediante técnicas biotecnológicas como la inoculación de bacterias promotoras del crecimiento en etapas específicas del cultivo, representa una alternativa para viveros, jardinería y programas de reforestación ornamental.

BIBLIOGRAFÍA

1. Camelo, R. M., Vera, M. S. P., & Bonilla, B. R. R. Mecanismos de acción de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 2011, pp 159-166.
2. Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. Sustainability, 2021, pp 10986.
3. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2009. La biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado.
4. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato IEEG. 2018. Áreas naturales protegidas.
5. Larcher, W. Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. Fourth Edition. Biologia Plantarum, 2003, pp 500.
6. Linares, E. y R. Bye.. Las plantas ornamentales en la obra de Francisco Hernández, “El preguntador del rey”. Arqueología mexicana, 2006, pp 48-57.
7. Mandel, J. R., R. B. Dikow, C. M. Siniscalchi, R. Thapa, L. E. Watson y V. A. Funk. A fully solved backbone phylogeny reveals numerous dispersals and explosive diversifications throughout the history of Asteraceae. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, pp 14083-14088.
8. Nava-Esparza, V.C. y H.A. Chimal. Plantas Mexicanas con Potencial Ornamental. Universidad Autónoma Metropolitana, 2006, pp 626.
9. Reséndez, A. M., Mendoza, V. O., Carrillo, J. A., Arroyo, J. P., & Ríos, P. C. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. Revista Colombiana de Biotecnología, 2018, pp 68-83.
10. Redonda-Martínez, R. Tribus de Asteraceae en México, morfología y clave de identificación. Acta Botanica Mexicana, 2022, pp 129.
11. Retana Gutiérrez, F. P. (2019). Manejo agronómico y caracterización de 5 cultivares de Zinnia.
12. Riaz, A., Arshad, M., Younis, A., Raza, A. y Hameed, M. A. N. S. O. O. R. Efectos de diferentes medios de cultivo sobre el crecimiento y la floración de *Zinnia elegans* cv. Punto azul. Revista de Botánica de Pakistán, 2008, pp 1579-1585.
13. Torriente, D. Aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de la caña de azúcar. Perspectivas de su uso en Cuba. Cultivos Tropicales, 2010, pp 00.

PROSPECCIÓN METAGENÓMICA DE ENZIMAS CON POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO ASOCIADAS A LA PLASTISFERA EN AMBIENTES TERRESTRES Y ACUÁTICOS

Jesús urbar-Ulloa[1], Pedro Javier Escobar-Turriza[1], Marcela Robles-Machuca[2], Alejandro Pereira-Santana[3], Leticia Casas-Godoy[4]*

[1]Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, [2]Unidad de Tecnología de Alimentos, Secretaría de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Nayarit, [3]SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, [4]SECIHTI-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco
*lcasas@ciatej.mx

RESUMEN

La acumulación sostenida de residuos plásticos en ambientes terrestres y acuáticos ha propiciado la emergencia de nuevos nichos ecológicos, conocidos colectivamente como la plastisfera[1], en los cuales se desarrollan comunidades microbianas adaptadas a la colonización y persistencia sobre polímeros sintéticos. La presión selectiva ejercida por estos materiales recalcitrantes ha favorecido la adaptación funcional de los microorganismos mediante mecanismos como la promiscuidad enzimática y la evolución convergente, permitiendo el aprovechamiento parcial de polímeros como el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS) y polipropileno (PP)[2]. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial biotecnológico de comunidades microbianas asociadas a sitios de acumulación plástica mediante un enfoque metagenómico orientado a la identificación de enzimas previamente vinculadas con procesos de transformación y degradación de poliolefinas[3]. Para ello, se seleccionaron dos ambientes contrastantes con alta carga de residuos plásticos: el vertedero público “El Iztete”, localizado en Tepic, Nayarit, y el cenote Tza Itzá, ubicado en Tecoh, Yucatán. En ambos sitios se realizaron muestreos *in situ*, seguidos de la extracción de ADN ambiental y la reconstrucción de los metagenomas correspondientes. Los ensamblajes obtenidos fueron sometidos a procesos de anotación funcional y análisis bioinformático dirigido, enfocados en la detección de genes que codifican enzimas reportadas en la literatura por su participación en la oxidación, escisión o modificación estructural de polímeros sintéticos. El análisis metagenómico reveló la presencia de un repertorio diverso de secuencias codificantes de enzimas con potencial actividad sobre poliolefinas, incluyendo principalmente oxidoreductasas e hidrolasas asociadas a rutas de transformación de compuestos poliméricos recalcitrantes. La diversidad taxonómica y funcional observada sugiere una adaptación progresiva de estas comunidades microbianas a ambientes enriquecidos en residuos plásticos, así como una posible especialización metabólica inducida por la disponibilidad constante de estos sustratos. En conjunto, los resultados obtenidos respaldan el valor de los ecosistemas asociados a la plastisfera como reservorios de recursos genéticos de alto interés biotecnológico y destacan el uso de estrategias metagenómicas como una herramienta robusta para la prospección de nuevas enzimas con potencial aplicación en el desarrollo de procesos sostenibles de biodegradación, transformación y valorización de residuos plásticos.

INTRODUCCIÓN

La acumulación de materiales plásticos en diversos ecosistemas representa una problemática ambiental de creciente interés debido a su persistencia y amplia distribución en ecosistemas terrestres y acuáticas[4]. La estabilidad química de estos polímeros favorece su fragmentación progresiva, particularmente por fotoxidación inducida por radiación ultravioleta, lo que conduce a la formación de microplásticos (<5 mm) capaces de interactuar con organismos y alterar procesos ecológicos[5].

En este contexto, el estudio de microorganismos con capacidad de transformar polímeros sintéticos emerge como una estrategia para comprender los mecanismos involucrados en la modificación de

materiales altamente recalcitrantes[6]. Diversos microorganismos han demostrado poseer sistemas enzimáticos oxidativos e hidrolíticos capaces de promover cambios estructurales en polímeros, favoreciendo su potencial aprovechamiento como fuente de carbono[7,8]. El análisis de estos sistemas microbiológicos y sus componentes enzimáticos (microbiomas) permite ampliar el conocimiento sobre rutas metabólicas asociadas a la transformación de plásticos y contribuye al desarrollo de enfoques biotecnológicos orientados a la mitigación de su impacto ambiental[9].

Sin embargo, una de las principales limitaciones de dicha estrategia son las técnicas clásicas basadas en cultivo, considerando que una proporción significativa de los microorganismos presentes en el ambiente no es cultivable bajo condiciones estándar de laboratorio[10]. Por otro lado, la metagenómica constituye una herramienta valiosa para la bioprospección de enzimas con potencial actividad sobre polímeros sintéticos, ya que permite acceder al material genético de comunidades microbianas complejas sin requerir el aislamiento y cultivo de los organismos[11]. Es por esto que mediante el análisis de ADN ambiental (*DNAe*), es posible identificar genes candidatos y predecir funciones enzimáticas potencialmente involucradas en la transformación de polímeros.

Bajo dicha estrategia, el análisis metagenómico de sitios impactados por acumulación de residuos plásticos, como el relleno sanitario “El Iztete” ubicado en Tepic, Nayarit, y el cenote “Tza Itza” en Tecoh, Yucatán, ofrece la oportunidad de identificar repertorios enzimáticos asociados a comunidades microbianas adaptadas a estos ambientes[1,12]. La integración de esta información con el conocimiento de factores abióticos, como la radiación ultravioleta, la humedad y la temperatura ambiental, permite proponer rutas enzimáticas sinérgicas, derivadas de los consorcios microbiológicos, implicadas en la transformación de polímeros como el polietileno y derivados (PE), polietileno tereftalato (PET), poliestireno (PS) y polipropileno (PP), contribuyendo a la comprensión de los procesos que gobiernan su modificación en condiciones ambientales.

TEORÍA

Los plásticos son polímeros sintéticos derivados principalmente del petróleo que, debido a sus propiedades fisicoquímicas tales como baja densidad, estabilidad química, resistencia mecánica, procesabilidad y versatilidad térmica, se han consolidado como materiales esenciales en diversos sectores, incluyendo las industrias alimentaria, farmacéutica, médica y manufacturera[13]. Estas características han favorecido un incremento sostenido en su producción global, la cual superó los 390 millones de toneladas en 2025[14]. Entre los polímeros de mayor volumen de producción se encuentran el PP, el PE en sus distintas variantes, el PET y el PS[14].

El incremento en la producción de materiales plásticos ha derivado en una acumulación significativa de residuos en distintos sitios, incluyendo vertederos, cuerpos de agua dulce, ecosistemas marinos, suelos forestales y selvas tropicales, generando efectos adversos sobre la flora, fauna y los procesos ecológicos asociados[15–17]. Adicionalmente, los plásticos son susceptibles a procesos de degradación abiótica, principalmente fotoxidación inducida por radiación ultravioleta, que provoca modificaciones estructurales tales como escisión de cadena, oxidación de grupos funcionales y fragilización del material[18]. Como consecuencia de estos procesos, se generan microplásticos (<5 mm), los cuales presentan elevada persistencia ambiental, capacidad de transporte a larga distancia y potencial asociación con efectos adversos en organismos vivos, incluyendo procesos inflamatorios, bioacumulación y posible transferencia a lo largo de las cadenas tróficas[19].

Las estrategias actualmente empleadas para el manejo de residuos plásticos, como el reciclaje mecánico y la pirólisis, no han logrado compensar el ritmo de producción global, lo que evidencia la necesidad de desarrollar alternativas complementarias que permitan reducir su acumulación ambiental[20]. En este contexto, la biodegradación microbiana representa una estrategia de interés creciente, debido a su potencial para transformar polímeros sintéticos mediante procesos enzimáticos que pueden conducir a la formación de intermediarios de menor peso molecular, su eventual mineralización y, en ciertos casos, la generación de metabolitos con valor biotecnológico[6].

El interés en la biodegradación de plásticos se intensificó a partir del aislamiento de *Ideonella sakaiensis*, microorganismo capaz de utilizar el tereftalato de polietileno (PET) como fuente de carbono mediante la acción de las enzimas PETasa y MHETasa, las cuales catalizan la hidrólisis secuencial del polímero hacia intermediarios de menor peso molecular[21]. A partir de este hallazgo, se han identificado otras enzimas con actividad sobre polímeros sintéticos, incluyendo poliuretanasas asociadas a la degradación de poliuretanos[22] y depolimerasas de polihidroxialcanoatos (PHA), lo que ha ampliado el conocimiento sobre enzimas capaces de actuar sobre sustratos poliméricos específicos y ha incrementado el interés en la elucidación de estos mecanismos catalíticos.

De manera paralela, diversos estudios han reportado la formación de consorcios microbianos en las inmediaciones y sobre la superficie de materiales plásticos, fenómeno descrito como plastisfera[1]. En estos microambientes se han propuesto mecanismos asociados a procesos de colonización, formación de biopelículas y secreción de enzimas extracelulares, principalmente de tipo oxidativo e hidrolítico, capaces de inducir modificaciones superficiales, oxidación de cadenas poliméricas y fragmentación parcial de materiales sintéticos como PE, PP, PET y PS[1,23].

Estos hallazgos sugieren una posible adaptación metabólica de comunidades microbianas frente a compuestos recalcitrantes de origen antropogénico. Sin embargo, la identificación de nuevos microorganismos con potencial para la transformación de plásticos se encuentra limitada por la fracción de especies cultivables bajo condiciones de laboratorio, lo que restringe la exploración de una proporción considerable de la diversidad microbiana ambiental potencialmente asociada a estos procesos.

En este contexto, la bioprospección de microorganismos y mecanismos enzimáticos mediante estrategias de secuenciación de ADN ambiental (*ADNe*) en sitios expuestos a acumulación de residuos plásticos, seguida de la reconstrucción de genomas y el análisis de genes y proteínas codificantes permite evaluar el efecto de la contaminación sobre la estructura y dinámica de las comunidades microbianas[24]. Este enfoque posibilita la comparación de consorcios presentes en ambientes impactados frente a aquellos de sitios no contaminados, facilitando la identificación de cambios en la diversidad taxonómica y funcional asociados a la presencia de polímeros sintéticos, así como la detección de genes codificantes de enzimas putativamente involucradas en su transformación[10].

Asimismo, el análisis de secuencias codificantes permite la anotación funcional de genes mediante herramientas bioinformáticas especializadas, facilitando la asignación de actividades putativas a enzimas de interés y la selección de candidatos con potencial aplicación en procesos de transformación de polímeros sintéticos[25]. En etapas posteriores, estos genes pueden ser sintetizados y expresados en sistemas heterólogos, lo que permite evaluar experimentalmente su actividad catalítica bajo condiciones controladas y valorar su posible integración en estrategias biotecnológicas orientadas a la modificación o degradación de plásticos[26].

Es ampliamente reconocido que la estructura y función de los consorcios microbianos se encuentran influenciadas por las características fisicoquímicas, biológicas y ecológicas de cada nicho [24]. Estas diferencias son particularmente evidentes al comparar ambientes terrestres y acuáticos, donde factores como disponibilidad de nutrientes, movilidad microbiana, gradientes de oxígeno, humedad y dinámica de dispersión condicionan la composición taxonómica y el repertorio metabólico de las comunidades presentes [9,27,28].

Bajo esta premisa, el vertedero público “El Iztete”, ubicado en Tepic, Nayarit, representa un sitio de interés debido a la acumulación continua de residuos sólidos urbanos, incluyendo materiales plásticos, que pueden favorecer la selección de microorganismos con capacidad de adaptación a compuestos recalcitrantes[12]. Por otro lado, el cenote “Tza Itzá”, ubicado en Tecoh, Yucatán, constituye un sistema acuático con carcterísticas particulares asociadas a su aislamiento ecológico[29] y el cual se encuentra sujeto a procesos de saneamiento periódico debido a la introducción de residuos por parte de los visitantes. El estudio comparativo de ambos entornos ofrece la oportunidad

de analizar posibles divergencias en la composición y diversidad de consorcios microbianos asociados a la presencia de plásticos, así como de identificar diferencias en el repertorio de genes potencialmente implicados en procesos de transformación de estos materiales.

De esta forma, el análisis metagenómico de estos sitios permite caracterizar el contexto microbiológico de cada entorno y realizar análisis comparativos de diversidad taxonómica y funcional. Asimismo, este enfoque facilita la identificación de genes codificantes de enzimas previamente asociadas a la transformación o degradación de polímeros sintéticos, permitiendo inferir posibles rutas metabólicas involucradas en dichos procesos. La integración de esta información permite proponer mecanismos potencialmente sinérgicos dentro de los consorcios microbianos, en los que distintos sistemas enzimáticos podrían participar de manera coordinada en la transformación progresiva de los plásticos.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestra de suelo y extracción de *ADNe* del relleno sanitario "El Iztete".

El muestreo de suelo se realizó en el vertedero público "El Iztete", ubicado en Cam. A Bellavista, 63501, Tepic, Nayarit, México (21.559287, -104.893574). El proceso de muestreo consistió en la recolección de aproximadamente 30 g del horizonte B del suelo (25 cm de profundidad), dónde se tomaron tres replicas cada 20 metros para tener un total de 33 muestras. Las mismas fueron trituradas y combinadas para obtener un conjunto total del muestreo de suelo de "El Iztete".

La extracción de ADN genómico se realizó utilizando métodos enzimáticos (lisozima, liticasa, proteinasa y RNAasa), químicos (SDS 20%, acetato de potasio 5M y fenol-cloroformo) y físico-mecánicos (agitación y choques térmicos) con el fin de lisar las estructuras celulares y poder acceder al material genómico.

Muestra de sedimentos y extracción de *DNAe* del cenote "Tza Itza".

El muestreo de agua se realizó en el cenote de acceso público "Tza Itza" ubicado en Tecoh, Yucatán, México (20.731594709874297, -89.46535483780633). El proceso de muestreo consistió en la extracción de 200 litros de agua a una profundidad de 7 metros debajo de la superficie. Dicha muestra fue filtrada para la recolección de sedimentos mediante membranas Whatman® de 0.2 μm las cuales se conservaron a -20°C hasta el momento de la extracción genómica.

La extracción se realizó triturando las membranas Whatman® de 0.2 μm con sedimentos en fracciones pequeñas y utilizando el kit *Quick-DNA Fecal/Soil Microbe Miniprep Kit* de Zymo Research. Finalmente, se verificó la extracción de *ADNe* de ambas muestras amplificando los genes 16S, para el caso de bacterias, y 5.8S para las levaduras y hongos mediante PCR en punto final.

Secuenciación *De Novo* de *ADNe* y reconstrucción metagenómica.

La secuenciación *De Novo* por extremos pareados (2x150 pares de bases) de ambas muestras, se realizó utilizando la plataforma *Illumina NovaSeq 6000* por la compañía *Novogene*. La obtención de genomas ensamblados a partir de metagenomas (MAG) se realizó haciendo una revisión de la calidad de las secuencias generadas mediante *fastqc* (S. Andrews, 2010) para después realizar un preprocesamiento de datos pareados mediante *trimmomatic*[30], herramienta optimizada para la secuenciación mediante Illumina bajo los siguientes parámetros *(PE; threads n; phred33; CROP=150; HEADCROP=10; SLIDINGWINDOW=4:20; MINLEN=75).*

Una vez realizado este preprocesamiento se verifica nuevamente la calidad de los datos mediante *fastqc* para después, realizar el ensamble de los fragmentos generados vía *megahit* [31](*k-list 55,75,95; threads n*). Este programa genera una serie de *contigs* ensamblados que serán comparados con las lecturas originales (*reads*) para ser mapeados mediante la herramienta *bbmap* [32] (*kfilter:22; subfilter:15; maxindel:80*).

Finalmente, se utilizó DASTool como herramienta para integrar los binnings obtenidos mediante maxbin (*~/DAS_Tool -t n --debug --search_engine=diamond --write_bins -l maxbinx*) y MetaBat *(~/DAS_Tool -t n --debug --search_engine=diamond --write_bins -l metabat*).

Diversidad microbiológica y perfil enzimático

La diversidad microbiológica fue obtenida utilizando los *contigs* generados previamente con *megahit* mediante *kraken2* [33] (*--gzip-compressed --paired --threads n*), mientras que el perfil enzimático fue obtenido utilizando mifaser [25].

Las enzimas putativas potencialmente involucradas en la degradación de LDPE fueron identificadas con base en rutas previamente reportadas de degradación microbiana de plásticos. Las clases enzimáticas consideradas incluyen peroxidasas decolorantes (DyP) (E.C. 1.11.1.19), alcohol deshidrogenasas (EC 1.1.1.1), aldehído deshidrogenasas (EC 1.2.1.5), carboxilesterasas (EC 3.1.1.1), lacasas (EC 1.10.3.2), lipasas (EC 3.1.1.3).

La identificación funcional de enzimas se realizó mediante *mifaser*, utilizando lecturas paired-end obtenidas por secuenciación shotgun en plataforma Illumina NovaSeq 6000. El análisis se ejecutó mediante el comando *mifaser* (threads 32; -l SRR11086756_1.fastq.gz SRR11086756_2.fastq.gz; -o ./output), empleando la base de datos *fusión-V2*, la cual contiene proteínas metabólicas curadas asociadas a ortólogos de KEGG y el uso complementario de inteligencia artificial para su anotación. Este procedimiento permitió la identificación de enzimas mediante la asignación de números EC y términos KO, generando perfiles funcionales del metagenoma a partir de la abundancia relativa de las funciones detectadas.

RESULTADOS

El ensamblaje metagenómico del vertedero público “El Iztete” generó un total de 308,720 contigs, con una longitud ensamblada acumulada de 250.5 Mbp y un contenido promedio de GC de 65.83%. El contig de mayor longitud alcanzó 67,060 pb, mientras que el ensamblaje presentó valores de N50 y L50 de 750 pb y 98,745 contigs, respectivamente. Por otro lado, el ensamblaje metagenómico correspondiente al cenote “Tza Itza” produjo 89,893 contigs, con una longitud ensamblada acumulada de 173.6 Mbp y un contenido promedio de GC de 59.21%. En este caso, el contig de mayor longitud fue de 519,941 pb, mientras que los valores de N50 y L50 fueron de 4,361 pb y 5,599 contigs, respectivamente.

En ambos ensambles se observó un grado considerable de fragmentación, fenómeno común en muestras metagenómicas ambientales debido a su elevada complejidad taxonómica y funcional [24]. No obstante, el metagenoma del vertedero “El Iztete” presentó un ensamblaje significativamente más fragmentado en comparación con el obtenido para el cenote “Tza Itza”, lo que podría estar relacionado con una mayor heterogeneidad microbiana y química derivada de la acumulación de residuos y contaminantes antropogénicos [23].

En la distribución taxonómica de los *bins* reconstruidos, la máxima resolución taxonómica alcanzada para la mayoría de ellos correspondió al nivel de familia. A este nivel, los MAGs recuperados del vertedero “El Iztete” mostraron una distribución relativamente homogénea, donde cada familia estuvo representada por un único MAG (16.7%), incluyendo Beijerinckiaceae, Rhodomicrobiaceae, Methylococcaceae, Xanthomonadaceae, Nocardioidaceae y Ktedonobacteraceae (Figura 1). Este patrón sugiere una menor diversidad taxonómica en comparación con el cenote, aunque con la presencia de familias frecuentemente asociadas con ambientes impactados y con el metabolismo de compuestos derivados de la degradación de materia orgánica compleja y xenobióticos[12,23].

En contraste, el MAG reconstruido a partir del cenote “Tza Itza” exhibió una distribución taxonómica heterogénea y diversa. La familia Rhodobacteraceae representó el grupo más abundante (12%), seguida por Burkholderiaceae, Microbacteriaceae, Ilumatobacteraceae y Nanopelagicaceae, cada

una con una representación aproximada del 8%. Las familias restantes estuvieron representadas por un solo MAG (4%), reflejando una comunidad microbiana taxonómicamente más diversa y equilibrada (Figura 1).

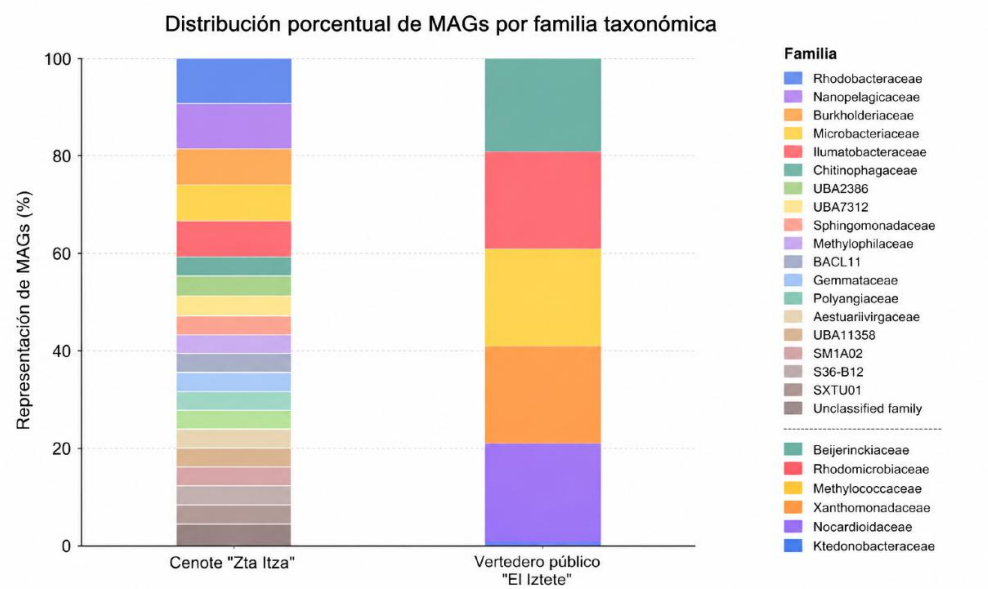


Figura 1. Distribución porcentual de los MAGs reconstruidos a nivel de familia taxonómica en los metagenomas del cenote “Tza Itza” y del vertedero público “El Iztete”. Los porcentajes representan la proporción de MAGs asignados a cada familia respecto al total de MAGs recuperados por ambiente, con base en la clasificación taxonómica obtenida mediante GTDB-Tk.

La clasificación funcional mostró perfiles globales similares entre ambos ambientes, dominados principalmente por oxidoreductasas (EC 1), transferasas (EC 2) e hidrolasas (EC 3), grupos con importancia metabólica intracelular. Sin embargo, el análisis a nivel de subclases EC reveló diferencias importantes en la representación funcional de ambos microbiomas (Figura 2A). En términos generales, el vertedero “El Iztete” presentó una mayor abundancia de secuencias asociadas con funciones oxidativas e hidrolíticas en comparación con el cenote “Tza Itza”, particularmente en subclases relacionadas con monooxigenasas, citocromo P450, alcohol deshidrogenasas y carboxilesterasas (Figura 2B). Este patrón podría estar asociado con la mayor complejidad química y presión selectiva presente en el vertedero, donde la acumulación de hidrocarburos, solventes y otros contaminantes orgánicos favorecería microorganismos con capacidades metabólicas más amplias y adaptadas a la transformación de compuestos recalcitrantes.

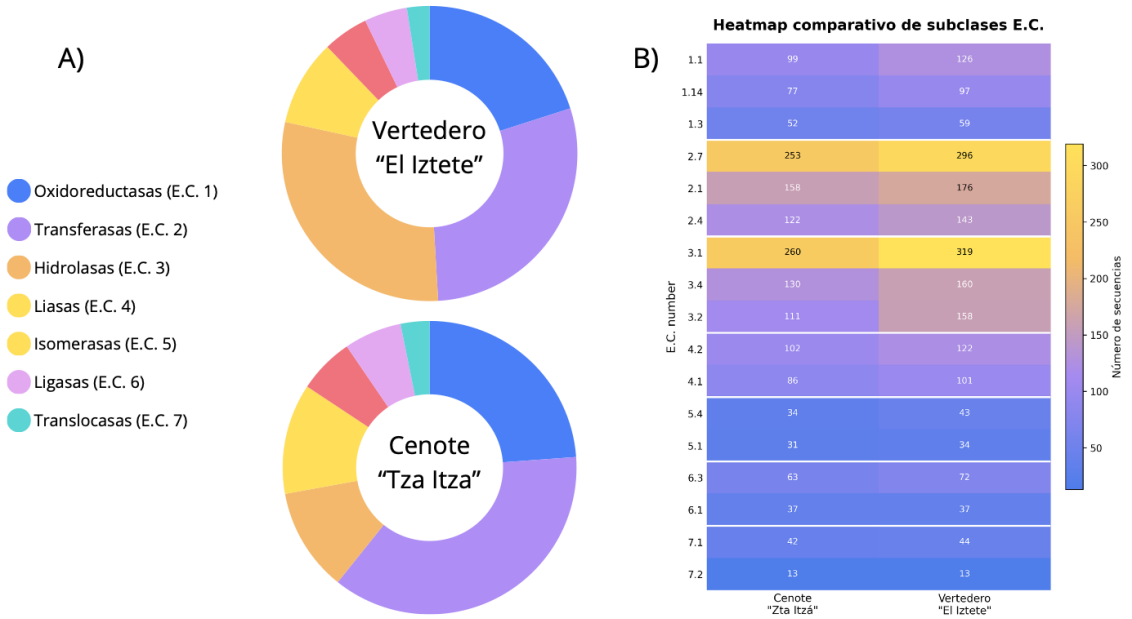


Figura 2. Clasificación funcional de enzimas identificadas en los metagenomas del cenote “Tza Itza” y del vertedero público “El Iztete”. A) Diagramas de distribución relativa de las principales clases enzimáticas clasificadas mediante números de la Comisión Enzimática (EC 1-7). B) Mapa de calor comparativo de subclases EC seleccionadas entre ambos microbiomas. La intensidad de color representa el número de secuencias asignadas a cada subclase.

A nivel funcional específico, se identificaron enzimas previamente asociadas con rutas de oxidación de hidrocarburos y transformación de polímeros, incluyendo lipasas (EC 3.1.1.3), carboxilesterasas (EC 3.1.1.1), alcohol deshidrogenasas (EC 1.1.1.1), aldehído deshidrogenasas (EC 1.2.1.5) y monooxigenasas de alcanos (EC 1.14.15.3). Asimismo, se detectaron múltiples secuencias relacionadas con monooxigenasas generales y proteínas asociadas con citocromo P450 en ambos ambientes, aunque con una representación mayor en el vertedero (Figura 3). Las monooxigenasas y sistemas tipo P450 participan comúnmente en reacciones de oxidación inicial de compuestos hidrofóbicos y xenobióticos, por lo que su enriquecimiento relativo en “El Iztete” resulta consistente con un entorno expuesto a mezclas complejas de contaminantes [23]. De manera similar, la mayor representación de lipasas y carboxilesterasas en este sitio podría reflejar una mayor disponibilidad de compuestos orgánicos susceptibles de hidrólisis, incluyendo lípidos, ésteres y productos parcialmente oxidados derivados de materiales poliméricos.

Aunque las asignaciones específicas de lacase (EC 1.10.3.2) y peroxidasa decolorante de colorantes (DyP; EC 1.11.1.19) fueron limitadas o ausentes bajo los criterios automatizados de filtrado, la exploración manual permitió identificar al menos una DyP en el microbioma del cenote. Esto sugiere que ambos ambientes podrían albergar sistemas oxidativos adicionales no completamente recuperados mediante anotación funcional automática, particularmente considerando la elevada diversidad y fragmentación de los ensamblajes metagenómicos.

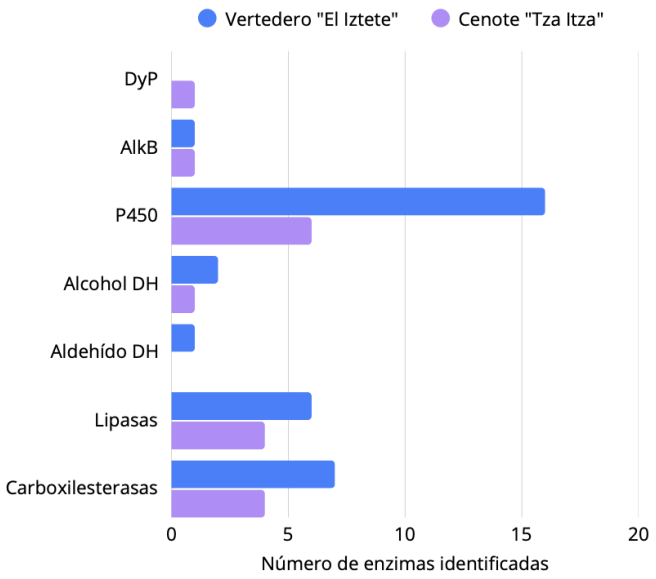


Figura 3. Comparación de enzimas potencialmente asociadas con rutas de transformación de hidrocarburos y polímeros identificadas en los metagenomas del cenote “Tza Itza” y del vertedero público “El Iztete”.

La integración de los resultados taxonómicos y funcionales sugiere que ambos microbiomas podrían albergar sistemas metabólicos complementarios potencialmente asociados con la transformación de polímeros recalcitrantes como PE, PP y PS[34,35]. En ambos ambientes se identificaron enzimas relacionadas con etapas clave de oxidación e hidrólisis, incluyendo monooxigenasas, proteínas asociadas con citocromo P450, alcohol deshidrogenasas, aldehído deshidrogenasas, lipasas y carboxilesterasas (Figura 3), lo que permite proponer un modelo funcional integrado para la transformación de compuestos tipo alcano derivados del deterioro abiótico inicial de estos polímeros.

Bajo este esquema, factores ambientales como radiación UV, temperatura y oxidación química podrían favorecer el deterioro abiótico inicial de los polímeros, generando fragmentos parcialmente oxidados y cadenas de menor peso molecular susceptibles de ser transformadas biológicamente[36]. Posteriormente, monooxigenasas y el citocromo P450 podrían participar en la oxidación inicial de cadenas hidrocarbonadas, promoviendo la formación de alcoholes y aldehídos[9]. Estos intermediarios podrían ser transformados sucesivamente mediante alcohol y aldehído deshidrogenasas hasta producir ácidos grasos potencialmente incorporables a rutas de β-oxidación y metabolismo central[37]. De manera paralela, la presencia de lipasas y carboxilesterasas sugiere capacidades hidrolíticas complementarias que podrían actuar sobre compuestos oxidados o enlaces susceptibles generados durante el deterioro del polímero (Figura 4). Asimismo, se propone la posible participación de transportadores tipo ABC y MFS en el intercambio de compuestos entre el medio extracelular y el espacio intracelular.

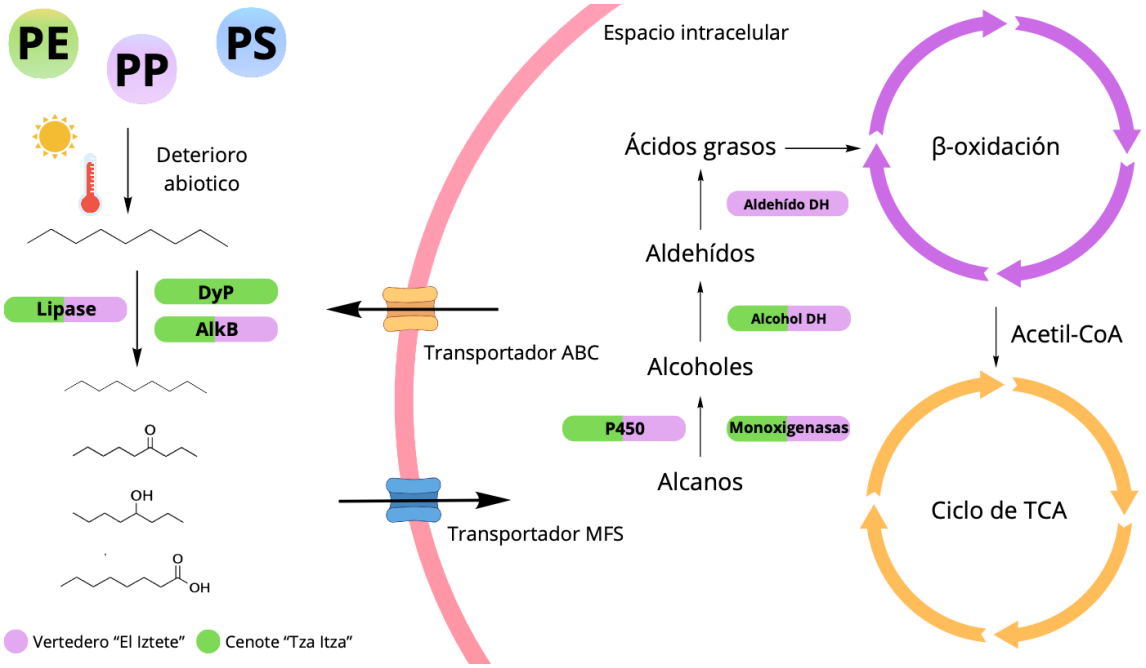


Figura 4. Modelo integrativo de rutas metabólicas potencialmente asociadas con la transformación de polímeros recalcitrantes en los microbiomas del cenote "Tza Itza" (Verde) y del vertedero público "El Iztete" (Lila). Esquema de una secuencia de eventos donde el deterioro abiótico (radiación UV y temperatura) generan fragmentos parcialmente oxidados derivados del PE, PP y PS, susceptibles de transformación microbiana. Las enzimas identificadas en ambos metagenomas, podrían participar en etapas sucesivas de oxidación e hidrólisis, promoviendo la formación de alcoholes, aldehídos y ácidos grasos potencialmente incorporables a rutas de β-oxidación y metabolismo central.

En conjunto, estos resultados respaldan la hipótesis de que ambos microbiomas podrían participar en procesos sinérgicos de transformación de polímeros bajo condiciones ambientales naturales. Sin embargo, se observan diferencias en la amplitud y representación de sus repertorios funcionales. En particular el vertedero "El Iztete" presentó el perfil funcional más enriquecido en actividades oxidativas e hidrolíticas potencialmente relacionadas con la transformación de compuestos recalcitrantes.

CONCLUSIONES

Aunque la evidencia obtenida no demuestra degradación directa de PE, PP o PS, los perfiles funcionales observados indican que ambos microbiomas poseen repertorios enzimáticos compatibles con rutas metabólicas previamente asociadas con la transformación de hidrocarburos y materiales poliméricos. En este contexto, el microbioma del vertedero público "El Iztete" presentó una mayor representación global de funciones oxidativas e hidrolíticas, consistente con un entorno sometido a mayor presión antropogénica y exposición a compuestos orgánicos complejos. Por otro lado el Cenote "Tza Itzá" mostró un perfil funcional más limitado, aunque también asociado con procesos potenciales de transformación de polímeros. En conjunto, estos resultados apoyan la hipótesis de que ambos ambientes podrían albergar consorcios microbianos con potencial metabólico para participar en procesos sinérgicos de transformación de polímeros bajo condiciones ambientales naturales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Di Pippo, F. *et al.* Plastisphere in lake waters: Microbial diversity, biofilm structure, and potential implications for freshwater ecosystems. *Environmental Pollution* 310, (2022).
2. Zrimec, J., Kokina, M., Jonasson, S., Zorrilla, F. & Zelezniak, A. Plastic-degrading potential across the global microbiome correlates with recent pollution trends. Preprint at https://doi.org/10.1101/2020.12.13.422558 (2020).
3. Wu, Z. *et al.* Biodegradation of conventional plastics: Candidate organisms and potential mechanisms. *Science of The Total Environment* 885, 163908 (2023).
4. Horton, A. A. Plastic pollution: When do we know enough? *J. Hazard. Mater.* 422, (2022).
5. Plastic pollution in the environment. *Environmental Toxicology and Pharmacology* vol. 73 Preprint at https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103274 (2020).
6. Gnanavel, G., Valli, V. M. J., Thirumarimurugan, M. & Kannadasan, T. Degradation of Plastics Using Microorganisms. (2013).
7. Rovaletti, A. *et al.* Recent Theoretical Insights into the Oxidative Degradation of Biopolymers and Plastics by Metalloenzymes. *International Journal of Molecular Sciences* vol. 24 Preprint at https://doi.org/10.3390/ijms24076368 (2023).
8. Tournier, V. *et al.* Enzymes' Power for Plastics Degradation. *Chemical Reviews* vol. 123 5612–5701 Preprint at https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00644 (2023).
9. Gewert, B., Plassmann, M. M. & Macleod, M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17, 1513–1521 (2015).
10. Inglis, L. K. & Edwards, R. A. How Metagenomics Has Transformed Our Understanding of Bacteriophages in Microbiome Research. *Microorganisms* 10, 1671 (2022).
11. Nam, N. N., Do, H. D. K., Loan Trinh, K. T. & Lee, N. Y. Metagenomics: An Effective Approach for Exploring Microbial Diversity and Functions. *Foods 2023, Vol. 12, Page 2140* 12, 2140 (2023).
12. Mishra, R. *et al.* Exploring genetic landscape of low-density polyethylene degradation for sustainable troubleshooting of plastic pollution at landfills. *Science of the Total Environment* 912, (2024).
13. Plastics Europe. Plastics-the fast facts 2023. (2023).
14. Plastics Europe. *Plastics the Fast Facts 2025* . (2024) doi:10.1%.
15. Oliveira, J. *et al.* Marine Environmental Plastic Pollution: Mitigation by Microorganism Degradation and Recycling Valorization. *Frontiers in Marine Science* vol. 7 Preprint at https://doi.org/10.3389/fmars.2020.567126 (2020).
16. Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J. & Ivanova, E. P. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers (Basel).* 5, 1–18 (2013).
17. Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D. & Iqbal, H. M. N. Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 4, (2021).
18. Hakkarainen, M. & Albertsson, A. C. Environmental degradation of polyethylene. *Advances in Polymer Science* vol. 169 177–199 Preprint at https://doi.org/10.1007/b13523 (2004).
19. Charlton-Howard, H. S., Bond, A. L., Rivers-Auty, J. & Lavers, J. L. 'Plasticosis': Characterising macro- and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. *J. Hazard. Mater.* 450, (2023).
20. Hopewell, J., Dvorak, R. & Kosior, E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* vol. 364 2115–2126 Preprint at https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311 (2009).
21. Yoshida, S. *et al. A Bacterium That Degrades and Assimilates Poly(Ethylene Terephthalate)*.
22. Rajan, A., Ameen, F., Jambulingam, R. & Shankar, V. Biodegradation of Polyurethane by Fungi Isolated from Industrial Wastewater—A Sustainable Approach to Plastic Waste Management. *Polymers (Basel)*. 16, 1411 (2024).
23. Liu, X. *et al.* Metagenomic analysis reveals altered microbial diversity and function along depth and age gradients in a sanitary landfill. *Chemical Engineering Journal* 520, 165531 (2025).
24. Mirete, S. *et al.* Metagenome-Assembled Genomes (MAGs): Advances, Challenges, and Ecological Insights. *Microorganisms* 13, 985 (2025).
25. Zhu, C. *et al.* Functional sequencing read annotation for high precision microbiome analysis. *Nucleic Acids Res.* 46, e23 (2017).

26. Balcázar-López, E. *et al.* Xenobiotic compounds degradation by heterologous expression of a trametes sanguineus laccase in trichoderma atroviride. *PLoS One* 11, (2016).
27. Sinisterra-Sierra, M. C. *et al.* Microbial diversity and enzymatic potential for plastic degradation in contaminated dumpsites in Mazamitla, Jalisco. *Environ. Res.* 283, (2025).
28. Chandra, P., Enespa & Singh, D. P. White-Rot Fungi for Bioremediation of Polychlorinated Biphenyl Contaminated Soil. *Fungal Biol.* 43–64 (2021) doi:10.1007/978-3-030-68260-6_3.
29. Suárez-Moo, P. *et al.* Changes in the sediment microbial community structure of coastal and inland sinkholes of a karst ecosystem from the Yucatan peninsula. *Sci. Rep.* 12, (2022).
30. Bolger, A. M., Lohse, M. & Usadel, B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data. *Bioinformatics* 30, 2114 (2014).
31. Li, D., Liu, C. M., Luo, R., Sadakane, K. & Lam, T. W. MEGAHIT: an ultra-fast single-node solution for large and complex metagenomics assembly via succinct de Bruijn graph. *Bioinformatics* 31, 1674–1676 (2015).
32. Bushnell, B., Rood, J. & Singer, E. BBMerge – Accurate paired shotgun read merging via overlap. *PLoS One* 12, e0185056 (2017).
33. Wood, D. E., Lu, J. & Langmead, B. Improved metagenomic analysis with Kraken 2. *Genome Biol.* 20, (2019).
34. Singh, P. *et al.* Microbial degradation of low-density polyethylene, polyethylene terephthalate, and polystyrene by novel isolates from plastic-polluted environment. 206, 188 (2024).
35. Choonut, A. *et al.* Microbial degradation of polypropylene microplastics and concomitant polyhydroxybutyrate production: An integrated bioremediation approach with metagenomic insights. *J. Hazard. Mater.* 490, (2025).
36. Watanabe, R. *et al.* Photodegradation behavior of polyethylene terephthalate analyzed by MALDI-TOFMS and ATR-FTIR microscopic analysis in combination with two-trace two-dimensional (2T2D) correlation mapping. *Polym. Degrad. Stab.* 208, (2023).
37. Wafaa, D. M., Sadik, M. W., Eissa, H. F. & Tonbol, K. Biodegradation of low-density polyethylene LDPE by marine bacterial strains Gordonia alkanivorans PBM1 and PSW1 isolated from Mediterranean Sea, Alexandria, Egypt. *Sci. Rep.* 15, 16769 (2025).

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA ZEOLITA EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ

Oscar Gilberto Alaniz Villanueva, Yatciry Yamile Rodríguez Montes, Juliana Rubio Sanchez, Felicidad Pérez Saldaña, María Elena Galindo Montelongo y Julio César Cruz Rivas

TecNM Campus Valle del Guadiana.
oscar.av@vguadiana.tecnm.mx.

RESUMEN

El maíz, es uno de los cultivos de cereales más importantes del mundo y en México, contribuyendo significativamente a la seguridad alimentaria, la alimentación del ganado, En muchas regiones agrícolas, los suelos han sufrido deterioro en su estructura y fertilidad debido al uso excesivo de fertilizantes químicos y a la falta de prácticas sostenibles. Ante este escenario la presente investigación se enfoca en evaluar cómo influye la incorporación de zeolita en cultivo de maíz con el híbrido P32208W. Realizándose en las áreas de investigación del TECNM-Campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. Estableciendo el cultivo en una superficie de media hectárea, a una densidad de siembra de 104,166 mil plantas por hectárea, bajo agricultura de conservación, a tres tratamientos T1 (Zeolita + Urea + Fosfato Mono amónico MAP), T2 (Urea + Fosfato Mono amónico MAP) y T3 (Testigo) con las variables de respuesta de altura de planta, diámetro de tallo, numero de frutos, numero de carreras y peso de la planta. Los análisis no paramétricos (Kruskal–Wallis y comparaciones de Dunn) mostraron diferencias significativas en el crecimiento vegetativo: T1 alcanzó las mayores alturas (≈2.8 m) y mayores diámetros con menor dispersión, evidenciando un efecto consistente de la zeolita sobre la elongación y el engrosamiento del tallo. En contraste, las variables de rendimiento (peso de planta y número de mazorcas) no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, lo que sugiere que, en las condiciones y dosis evaluadas, la zeolita mejora principalmente la morfología y vigor de las plantas más que la producción final. El coeficiente de Spearman indicó asociación positiva entre altura y diámetro, coherente con una mejor disponibilidad de agua y nutrientes por la capacidad de intercambio catiónico y retención hídrica de la zeolita. Estos resultados respaldan el uso de zeolita como estrategia para robustecer el crecimiento del maíz en sistemas conservacionistas y motivan ensayos de dosis–costo–beneficios orientados a traducir ese vigor vegetativo en mayor rendimiento. Estos hallazgos permiten concluir que el efecto de la zeolita se observa principalmente en el desarrollo morfológico de la planta, más que en el rendimiento final, lo que constituye un elemento relevante para interpretar su potencial agronómico en sistemas de agricultura de conservación.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays,* L.), comúnmente conocido como maíz, es uno de los cultivos de cereales más importantes del mundo y en México, contribuyendo significativamente a la seguridad alimentaria, la alimentación del ganado y numerosas aplicaciones industriales (Shafiq *et al*., 2025). Sin embargo, el rendimiento de este cultivo depende en gran medida de las condiciones del suelo y del manejo agronómico. En muchas regiones agrícolas, los suelos han sufrido deterioro en su estructura y fertilidad debido al uso excesivo de fertilizantes químicos y a la falta de prácticas sostenibles.

En los últimos años, la búsqueda de alternativas que permitan mejorar la calidad del suelo ha cobrado importancia. Entre estas alternativas, la zeolita, un mineral de origen volcánico con una estructura microporosa, ha demostrado ser eficaz para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, como potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica. Gracias a su alta capacidad de intercambio catiónico, retención de agua y capacidad para adsorber nutrientes, la zeolita puede favorecer un mejor desarrollo del cultivo y una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes.

Para el 2024 México se ubicó como el octavo productor a nivel internacional en producción de maíz aportando 1.9 por ciento al volumen producido a nivel mundial (FIRA, 2024), con 4,375,041.35 toneladas, con una superficie de siembra de 588,984.43 hectáreas, siendo que las cinco entidades líderes son Aguascalientes el principal productor, ocupando las otras cuatro posiciones Durango, Coahuila, México y por último Guanajuato (SIAP, 2025).

La investigación se enfoca en evaluar cómo influye la incorporación de zeolita en cultivo de maíz híbrido P32208W de Pioneer®. Esta variedad de maíz se caracteriza por su gran capacidad de producción y su resistencia a distintas condiciones meteorológicas. El principal objetivo de este trabajo es determinar si el uso de zeolita produce un cambio notable tanto en la calidad del suelo, como en el rendimiento del cultivo, comparado con parcelas donde no se aplicó este mineral.

TEORÍA

Maiz

El maíz mexicano se cultiva tanto con variedades híbridas comerciales como con criollas tradicionales, dependiendo del tipo de productor, disponibilidad de agua y condiciones agroclimáticas. A nivel nacional, el maíz es fundamental no solo como alimento básico, sino también como materia prima para la ganadería, la industria de harinas, el almidón y la bioenergía (INEGI, 2023). Es considerado de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano (uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen), como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales (Golik *et al*., 2018).

Maíces híbridos y criollos

El maíz (*Zea mays,* L.) es una especie de gran diversidad genética que permite la coexistencia de variedades criollas (nativas) e híbridos. Los maíces criollos son aquellos que han sido conservados y seleccionados por comunidades campesinas a lo largo del tiempo, adaptándose a las condiciones agroecológicas locales y representando un recurso genético de gran valor para la seguridad alimentaria (*Ortega et al*., 2019).

Por otro lado, los híbridos son el resultado del mejoramiento genético mediante el cruzamiento de líneas puras, con el propósito de obtener mayores rendimientos, uniformidad y resistencia a enfermedades o estrés ambiental. En México, los híbridos comerciales como el P32208W han mostrado alto potencial productivo, especialmente en condiciones controladas o de riego (Pioneer®, 2023).

Fertilización del Maíz

La fertilización del maíz es uno de los factores de mayor impacto en el rendimiento final del cultivo, debido a que el maíz es una especie con alta demanda de nutrientes, particularmente de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El manejo adecuado de la fertilización depende de las condiciones del suelo, la variedad sembrada, el historial de manejo del lote y las prácticas agronómicas implementadas (CIMMYT, 2021).

Zeolita origen y propiedades

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos de origen volcánico o sintético con una estructura microporosa, capaces de intercambiar cationes y retener moléculas de agua en sus cavidades (Gunawan *et al*., 2020). Su fórmula general es $M_x/n[Al_xSi_yO_{2x+y}]\cdot mH_2O$, donde M representa los cationes intercambiables (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, entre otros).

En la agricultura, su importancia radica en su alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), que permite retener nutrientes como amonio (NH_4^+) y potasio (K^+), liberándolos de forma gradual, lo que incrementa la eficiencia de los fertilizantes (Syafrul *et al*., 2023). Además, mejora la retención de

humedad, reduce la lixiviación y estabiliza el pH del suelo, contribuyendo al desarrollo de un sistema radicular más vigoroso (Sahin *et al*., 2020).

La respuesta del maíz al uso de zeolita puede variar según la variedad genética, dosis de fertilización y condiciones edáficas. En híbridos de alto potencial como el P32208W, la aplicación de zeolita puede optimizar la absorción de nitrógeno y potasio, mejorando la relación entre crecimiento vegetativo y formación de grano (Sarmiento-López *et al*., 2025).

La sinergia entre zeolita y fertilización nitrogenada permite una mayor eficiencia del sistema suelo-planta, ya que se disminuye la pérdida de nutrientes y se garantiza un suministro constante durante todo el ciclo del cultivo. Además, la zeolita contribuye a la sostenibilidad agrícola, al reducir el uso excesivo de fertilizantes químicos y mitigar la contaminación por lixiviación de nitratos (Affendi *et al*., 2023). Diversas investigaciones han demostrado efectos positivos del uso de zeolita en el cultivo de maíz. Sarmiento-López *et al*. (2025) señala que la combinación de zeolita enriquecida con nitrógeno y micorrizas arbusculares incrementa significativamente el crecimiento y rendimiento del maíz, al mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes.

PARTE EXPERIMENTAL

Metodología

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en las áreas de investigación del TECNM-Campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, ubicado en la carretera Durango-Mexico Km 22.5 en el Ejido Villa Montemorelos Durango. Estableciendo el cultivo en una superficie de media hectárea, a una densidad de siembra de 104,166 mil plantas por hectárea, bajo agricultura de conservación.

Labranza primaria

Se realizó un paso de rastra para desmenuzar los terrones del suelo y permitir una cama de siembra adecuada para la germinación de la semilla. Esta práctica también facilita la incorporación de materia orgánica, lo que incrementa la disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Las labores se realizaron con un tractor John Deere® 6110 D, utilizando una rastra aradora niveladora tipo pesada de 24 discos Kelly®, trabajando a una profundidad promedio de 15 cm. Estas labores permiten mejorar la estructura física del suelo y asegurar una siembra uniforme (SAGARPA, 2022).

Siembra

La siembra se efectuó con la sembradora de levante de dos carros tipo Z®, utilizando la variedad de maíz híbrido P32208W, caracterizada por su alto potencial de rendimiento y buena adaptación a condiciones de temporal. Se estableció una densidad de 104,166 plantas por hectárea, con separación de .80 cm entre surcos y .12 cm entre plantas.

Estructura experimental

El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones, para reducir el error experimental y comparar el efecto de los tratamientos en condiciones homogéneas de campo (Montgomery, 2017).

Se aplicaron tres tratamientos a una relación 1:1:1 de Urea, MAP Y Zeolita a una granulometría de 2 micras, según el siguiente diseño:

T1: Zeolita + Urea + MAP
T2: Urea + MAP
T3: Testigo (sin fertilización)

Variables de respuesta

Las variables de respuesta corresponden a los atributos o características medidas en el experimento, cuya variación permite evaluar el efecto de los tratamientos aplicados sobre el objeto de estudio. En la presente investigación, las variables de respuesta consideradas fueron: altura de planta, diámetro del tallo, número de frutos por planta, peso de la mazorca y número de carreras de la misma.
Estas variables se seleccionaron por su relevancia en la determinación del crecimiento y rendimiento del cultivo, permitiendo analizar de manera integral el impacto de los diferentes tratamientos sobre su desarrollo fisiológico y productivo.

RESULTADOS

Para el análisis estadístico de los datos se aplicaron pruebas no paramétricas, debido a que las variables evaluadas no cumplieron el supuesto de normalidad. Utilizando la prueba de Kruskal–Wallis para comparar el efecto de los tratamientos sobre las variables de crecimiento y rendimiento del maíz: altura de planta, diámetro de tallo, peso de planta y número de mazorcas. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos en la altura de planta ($\chi^2=14.50$; $p<0.001$) y en el diámetro de tallo ($\chi^2=17.43$; $p<0.001$), lo que indica que los tratamientos influyeron de manera significativa en el desarrollo vegetativo del cultivo. En contraste, el peso de planta ($\chi^2=2.74$; $p=0.25$) y el número de mazorcas ($\chi^2=4.80$; $p=0.09$) no presentaron diferencias estadísticamente significativas, por lo que no se evidenció un efecto claro de los tratamientos sobre las variables asociadas al rendimiento final.

Posteriormente, se aplicó la prueba post hoc de Dunn para identificar entre qué tratamientos se encontraban las diferencias detectadas por Kruskal–Wallis. Los resultados indicaron que los tratamientos con aplicación de zeolita presentaron mayores valores de altura y diámetro en comparación con el testigo, mientras que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con zeolita. Esto sugiere que la incorporación de zeolita favoreció principalmente el crecimiento vegetativo del maíz, expresado en mayor elongación de la planta y engrosamiento del tallo.

Asimismo, se realizó un análisis de correlación de Spearman entre la altura de planta y el diámetro de tallo, obteniéndose una asociación positiva moderada y significativa ($\rho=0.386$; $p=0.019$). Este resultado indica que, conforme aumenta la altura de la planta, también tiende a incrementarse el diámetro del tallo, lo cual refleja una respuesta fisiológica coherente en el desarrollo estructural del maíz. En conjunto, los resultados estadísticos permiten señalar que el efecto de la zeolita se manifestó principalmente en variables morfológicas del cultivo, particularmente altura y diámetro de tallo, más que en variables de rendimiento como peso de planta y número de mazorcas. Por ello, la zeolita puede considerarse una alternativa con potencial para mejorar el vigor vegetativo del maíz bajo condiciones de agricultura de conservación en suelo arcilloso, aunque se recomienda continuar con evaluaciones posteriores para determinar su efecto sobre rendimiento y productividad final.

Para evaluar el efecto de la zeolita en el suelo del cultivo de maíz bajo agricultura de conservación se analizaron variables químicas del suelo, como potencial de hidrogeno (pH) y conductividad eléctrica (CE). Debido a que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, se emplearon pruebas no paramétricas. Mediante ART-ANOVA se observó que el pH del suelo presentó diferencias significativas entre tratamientos ($F^{*}_{ART\ 3,56}=14.09$, $^{*}p<0.001$). Las comparaciones post hoc con ajuste Bonferroni indicaron diferencias entre T1–T2 ($p<0.0001$) y T2–T3 ($p=0.0001$), lo que evidencia que los tratamientos modificaron la reacción química del suelo.

CONCLUSIONES

La sinergia entre la zeolita y la fertilización nitrogenada favorece una mayor eficiencia del sistema suelo-planta, debido a que reduce la pérdida de nutrientes y asegura un suministro constante a lo largo del ciclo del cultivo. Asimismo, la incorporación de zeolita contribuye a la sostenibilidad agrícola

al disminuir la necesidad de fertilizantes químicos y mitigar la contaminación asociada a la lixiviación de nitratos. Los resultados obtenidos permiten concluir que el efecto de la zeolita se manifiesta principalmente en el desarrollo morfológico de la planta más que en el rendimiento final, lo cual representa un aspecto relevante para interpretar su potencial agronómico dentro de sistemas de agricultura de conservación. Es importante señalar que la dosis de fertilización empleada en este estudio fue menor en comparación con la utilizada comúnmente por los productores; aun así, se obtuvieron resultados significativos al combinarla con zeolita.

BIBLIOGRAFÍA

1. Affendi, S., Jamilah, I., Berd, I., Haryoko, W., Utama, Z. H., & Novia, P. (2023). The role of zeolite and NPK fertilizer on maize growth in Inceptisol. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition.
2. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo [CIMMYT]. (2020). Guía práctica para el manejo integrado de malezas en maíz y trigo. CIMMYT México.
3. CIMMYT. (2021). Guía para la fertilización del maíz en sistemas de producción sostenible.
4. FIRA (2024). Panorama agroalimentario en maíz.
5. Golik, S. I., Larran, S., Gerard, G. S., & Fleitas, M. C. (2018). Maiz: Importancia, origen, sistemática, morfología y composición química.
6. Gunawan, B., Wibowo, T., & Kusuma, A. (2020). The application of zeolite to increase nitrogen use efficiency in corn. Planta Tropika, 8(1), 35–41.
7. INEGI. (2023). Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022: Durango. https://www.inegi.org.mx
8. Ortega, P., Hernández, G., & Rivera, S. (2019). Maíces nativos de México: Importancia y conservación. Universidad Autónoma Chapingo.
9. Pioneer. (2023). Catálogo de híbridos de maíz Pioneer 2023. Corteva Agriscience México.
10. Pioneer Corteva Agriscience. (2024). Ficha técnica P32208W. https://www.pioneer.com
11. Sahin, S., Uçar Tutar, G., & Geboloğlu, N. (2020). Effects of zeolite application on nitrate and maize growth. Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology, 8(1), 187–191.
12. SAGARPA. (2017). Cuadernillos de la investigación de la planeación Agrícola Nacional 2017-2030.
13. Sarmiento-López, L. G., et al. (2025). Combination of nitrogen-enriched zeolite and arbuscular mycorrhizal symbiosis to improve maize growth. Agronomy, 15(1), 156.
14. Shafiq, M. R., Ahmad, M. T., Reinhardt, L. y Ramzan, J. (2025). Avanzando en el mejoramiento del maíz: una revisión de los enfoques genéticos y las estrategias de mejoramiento. Revista de Biotecnología Comercial, 30(3).
15. SIAP (2025). Avance se siembras y cosechas. Gobierno de México.
16. Syafrul, A., Jamilah, I., & Berd, I. (2023). Zeolite and NPK fertilizer on maize growth and soil properties in Inceptisol. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 9(3), 45–52.
17. Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments (9th ed.). John Wiley & Sons.

OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum Lycopersicum*) CON ZEOLITA COMO MEJORADOR DE SUELO

Julio César Cruz-Rivas[1], Selena Guadalupe Salazar-González[1], Mayela García-Andrade[2]
Oscar Silva-Marrufo[3,4*], Beatriz Betancourt-Chaidez[5] y Felicidad Pérez-Saldaña[1]

[1]Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. [2]Universidad Tecnológica de Coahuila. *[3]Universidad Tecnológica de Rodeo. [4]Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario [5]Universidad Tecnológica de Poanas.
ing.silva.m@hotmail.com, julio.cr@vguadiana.tecnm.mx

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una de las principales hortalizas cultivadas a nivel mundial debido a su importancia económica y alimentaria. Sin embargo, la intensificación agrícola ha incrementado el uso de fertilizantes minerales, provocando problemas de degradación y contaminación de los suelos. La zeolita es un aluminosilicatos natural con alta capacidad de intercambio catiónico y retención de humedad, por lo que se ha propuesto como mejorador de suelo y complemento de la fertilización convencional. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes dosis de zeolita sobre la producción y características físicas del fruto de tomate bajo condiciones de invernadero. El experimento se realizó en el Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana durante el ciclo agrícola 2025. Se evaluaron tres tratamientos: T1=3 t ha^{-1} de zeolita, T2=2 t ha^{-1} de zeolita y T3=testigo sin aplicación. Se registró peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial de los frutos. Los datos fueron analizados mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples de Dunn. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos para todas las variables evaluadas (p<0.001). El tratamiento testigo presentó los mayores valores de peso y tamaño del fruto, mientras que los tratamientos con zeolita registraron valores inferiores. Se concluye que las dosis evaluadas no mejoraron las características productivas del cultivo, por lo que se recomienda continuar evaluando diferentes niveles de aplicación y condiciones de manejo.

Palabras clave: Zeolita, tomate, agricultura protegida, rendimiento, fertilización.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) constituye una de las hortalizas más importantes a nivel mundial debido a su elevada demanda comercial, valor nutricional y versatilidad en la alimentación humana (FAO, 2023). México se encuentra entre los principales productores y exportadores de tomate, generando importantes beneficios económicos para el sector agrícola y contribuyendo significativamente al comercio agroalimentario nacional (SIAP, 2025).

El incremento de la productividad agrícola ha estado asociado con el uso intensivo de fertilizantes minerales; sin embargo, esta práctica ha provocado problemas relacionados con la degradación del suelo, disminución de la materia orgánica y contaminación de cuerpos de agua por lixiviación de nutrientes (Toro *et al*., 2006). Ante esta situación, se han desarrollado alternativas orientadas a mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes y promover una agricultura más sostenible.

La zeolita es un mineral aluminosilicatado natural caracterizado por su elevada capacidad de intercambio catiónico, capacidad de adsorción y retención de agua (Novo Fernández y Costafreda Mustelier, 2018). Estas propiedades le permiten actuar como acondicionador de suelo y favorecer la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Malesio *et al*., 2013). Diversos estudios han reportado incrementos en rendimiento y eficiencia de fertilización mediante el uso de zeolitas en cultivos hortícolas (Chaveli *et al*., 2012; Soca y Lorente, 2015).

Sin embargo, la respuesta de los cultivos depende de factores como la dosis aplicada, las características del suelo, el manejo agronómico y las condiciones ambientales. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes dosis de zeolita sobre el rendimiento y las características físicas del fruto de tomate bajo condiciones de agricultura protegida.

ANTECEDENTES

Las zeolitas naturales son minerales cristalinos formados principalmente por aluminosilicatos hidratados con estructuras porosas tridimensionales que les permiten almacenar agua y nutrientes (Novo Fernández y Costafreda Mustelier, 2018). Su capacidad de intercambio catiónico puede superar los 200 cmol(+)/kg, favoreciendo la retención de amonio, potasio y otros elementos esenciales para el crecimiento vegetal (Toro *et al*., 2006).

En agricultura, las zeolitas se han utilizado como acondicionadores de suelo, fertilizantes de liberación lenta y mejoradores de la eficiencia de fertilización (Chaveli *et al*., 2012). Entre sus principales beneficios se encuentran el incremento de la capacidad de retención de agua, la reducción de pérdidas por lixiviación y la mejora de la disponibilidad nutrimental para los cultivos (Malesio *et al*., 2013).

La incorporación de zeolita al suelo puede favorecer el desarrollo radicular, mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la eficiencia del uso del agua, aspectos de gran relevancia en sistemas agrícolas bajo condiciones de estrés hídrico (Vázquez-Baxcajay *et al*., 2025). Asimismo, se ha documentado que este mineral puede actuar como reservorio temporal de nutrientes, disminuyendo pérdidas por volatilización y lavado (Toro *et al*., 2006).

En cultivos hortícolas, diversos autores han reportado efectos positivos sobre el crecimiento vegetativo, producción y calidad de frutos; sin embargo, los resultados varían dependiendo de la especie cultivada, las dosis utilizadas y las condiciones edafoclimáticas del sitio experimental (Soca y Lorente, 2015; Cordero-Villa *et al*., 2018).

PARTE EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se desarrolló durante el ciclo agrícola 2025 en el invernadero del Huerto Escuela del Tecnologico Nacional de Mexico campus Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, ubicado en Villa Montemorelos, Durango, México. El cultivo evaluado fue tomate (*Solanum lycopersicum*) tipo saladette, establecido bajo condiciones de agricultura protegida, sistema que permite reducir la exposición del cultivo a factores ambientales adversos y mejorar el manejo agronómico de la producción (Jaramillo *et al*., 2012; Hermosillo-Alba *et al*., 2026).

Previo al establecimiento del cultivo, se realizaron labores de preparación del terreno mediante arado con motocultor, con la finalidad de mejorar la aireación y estructura del suelo. Posteriormente, se formaron camas de cultivo de aproximadamente 70 a 80 cm de ancho y 15 m de largo, con separación de 90 cm entre pasillos. En cada cama se instaló riego por cintilla a doble hilera y acolchado plástico, prácticas comúnmente utilizadas en la producción protegida de tomate para favorecer el control de humedad, reducir la competencia con malezas y mejorar la eficiencia del riego (Jaramillo *et al*., 2012).

Se evaluaron tres tratamientos relacionados con la aplicación de zeolita como mejorador de suelo: T1 = 3 t ha^{-1} de zeolita, equivalente a 4.8 kg por cama; T2 = 2 t ha^{-1} de zeolita, equivalente a 3.2 kg por cama; y T3 = testigo sin aplicación de zeolita. Cada tratamiento contó con 15 repeticiones, para un total de 45 unidades experimentales. La aplicación de zeolita se realizó con el propósito de evaluar su posible efecto sobre el rendimiento y las características físicas del fruto, considerando que este mineral puede mejorar la retención de humedad y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Toro *et al*., 2006; Novo Fernández y Costafreda Mustelier, 2018).

El trasplante de las plántulas se realizó manteniendo una distancia aproximada de 30 a 45 cm entre plantas, con la finalidad de favorecer una adecuada ventilación, distribución espacial y desarrollo del cultivo. Durante el ciclo productivo se aplicaron prácticas de manejo agronómico como fertirrigación, control manual de malezas y tutorado. El tutorado se realizó aproximadamente 15 días después del trasplante, mediante el guiado del tallo principal con hilo sujeto a la estructura superior del invernadero, práctica recomendada para mantener la planta erguida, evitar el contacto del follaje y frutos con el suelo, facilitar la cosecha y reducir el riesgo de enfermedades (Escobar, 2010).

Las variables de respuesta evaluadas fueron peso del fruto, diámetro polar y diámetro ecuatorial. El peso se determinó con una balanza analítica, registrando el peso individual de los frutos cosechados. El tamaño del fruto se evaluó mediante la medición del diámetro polar y ecuatorial con vernier digital, siguiendo criterios de medición física empleados en la caracterización de frutos de tomate (Jaramillo *et al*., 2012; Silva-Marrufo *et al*., 2025). Las mediciones se realizaron durante el periodo comprendido del 18 de junio al 13 de agosto de 2025.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se empleó estadística descriptiva mediante medianas y rangos intercuartílicos, debido a la naturaleza de los datos y a que no se asumió normalidad en las variables evaluadas. La comparación entre tratamientos se realizó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, utilizada para comparar más de dos grupos independientes cuando no se cumplen los supuestos de normalidad requeridos por el ANOVA. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba post hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para identificar diferencias entre pares de tratamientos. El análisis permitió evaluar el efecto de las dosis de zeolita sobre las características productivas y morfológicas del fruto.

RESULTADOS Y DISCUSIÒN

Los resultados del análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis mostraron diferencias significativas entre tratamientos para las variables peso del fruto, diámetro polar y diámetro ecuatorial ($p < 0.001$). Estos resultados indican que la aplicación de zeolita influyó sobre las características físicas evaluadas, aunque no de la manera esperada.

Para el peso del fruto se obtuvo un valor de $\chi^2 = 107.02$ ($p < 0.001$). Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Dunn con corrección Bonferroni evidenciaron diferencias significativas entre todos los tratamientos, observándose la siguiente tendencia: Testigo > Cama 2 > Cama 3.

El tratamiento testigo presentó la mayor mediana de peso (90 g), seguido por Cama 2 (73.5 g) y Cama 3 (63 g). La Figura 1 muestra el comportamiento temporal del peso promedio del fruto durante el periodo de evaluación. Se observa que el tratamiento Testigo presentó consistentemente los mayores valores de peso a lo largo del ciclo de producción, mientras que los tratamientos con aplicación de zeolita registraron valores inferiores. Particularmente, Cama 3 presentó los menores pesos promedio durante la mayor parte del periodo evaluado. Estos resultados sugieren que las dosis de zeolita utilizadas no favorecieron el incremento del peso del fruto bajo las condiciones experimentales estudiadas.

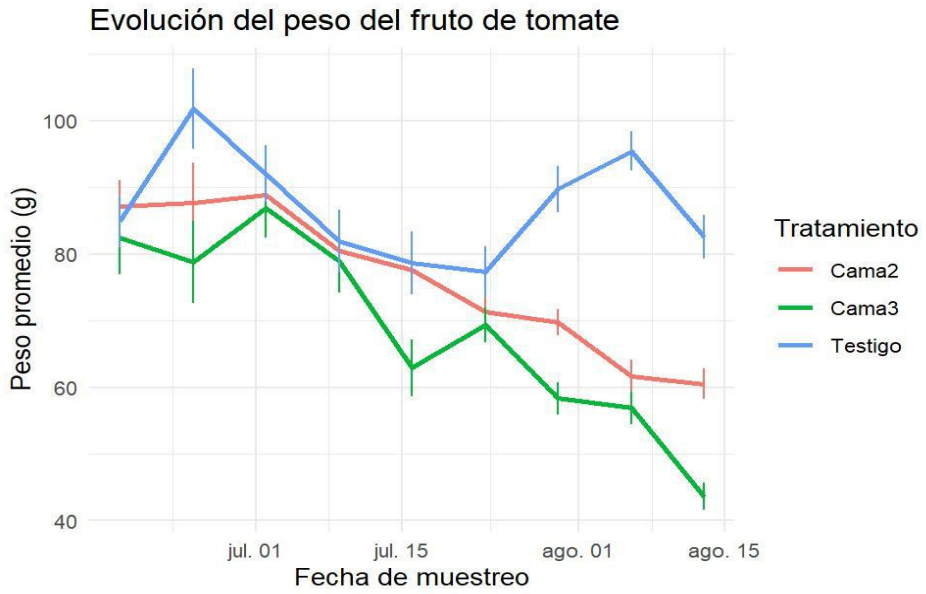


Figura 3. Evolución temporal del peso promedio del fruto de tomate bajo diferentes tratamientos de zeolita.

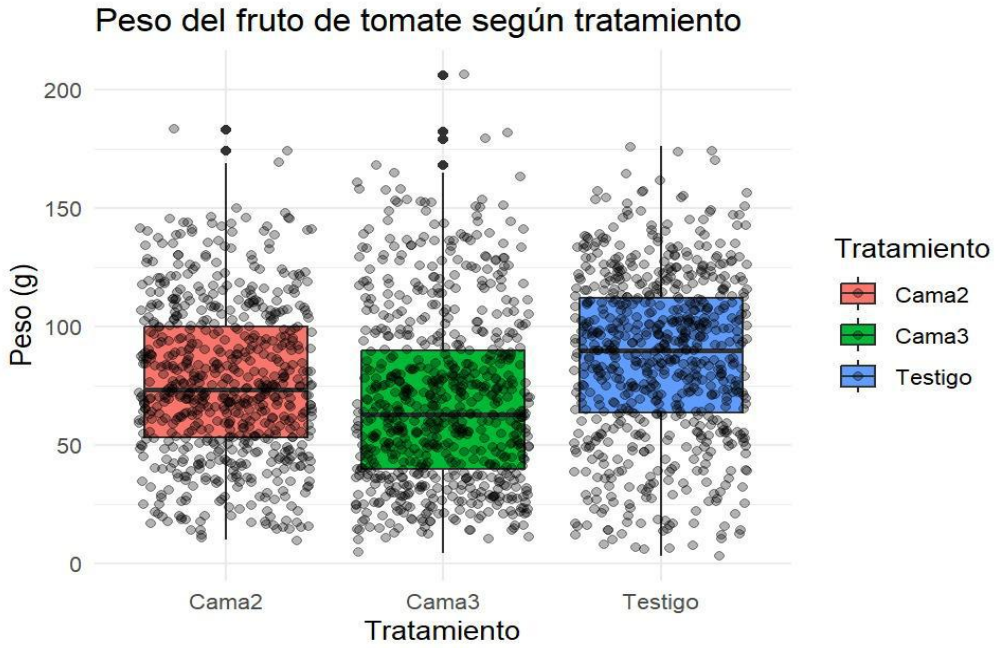


Figura 4. Distribución del peso del fruto de tomate por tratamiento.

La Figura 2 muestra la distribución del peso de los frutos obtenidos en cada tratamiento. Aunque existe variabilidad dentro de los grupos y cierta superposición entre los rangos observados, se aprecia una tendencia clara hacia mayores pesos en el tratamiento Testigo. Las diferencias observadas fueron corroboradas mediante la prueba de Kruskal-Wallis y las comparaciones múltiples de Dunn, las cuales indicaron diferencias significativas entre todos los tratamientos evaluados ($p < 0.001$).

Resultados similares fueron observados para el diámetro polar ($\chi^2 = 93.68$; $p < 0.001$) y el diámetro ecuatorial ($\chi^2 = 84.18$; $p < 0.001$), donde el tratamiento testigo presentó los mayores valores y Cama

3 los menores. Aunque los diagramas de caja mostraron cierto grado de superposición entre tratamientos, las pruebas estadísticas confirmaron diferencias significativas entre ellos.
La literatura reporta que la zeolita puede mejorar la retención de humedad y la disponibilidad nutrimental en el suelo, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Chaveli *et al*., 2012; Toro *et al*., 2006). Sin embargo, en el presente estudio dichas ventajas no se reflejaron en un incremento del tamaño ni del peso del fruto. Esta respuesta podría estar asociada a las dosis empleadas, al tiempo de incorporación del mineral o a las condiciones particulares del suelo y manejo agronómico del experimento con altas concentraciones como lo menciona Sariñana-Aldaco *et al*. (2023).

Por otra parte, se encontraron correlaciones positivas superiores a 0.85 entre peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial, lo que coincide con lo reportado para frutos de tomate, donde el incremento en las dimensiones del fruto generalmente se traduce en una mayor acumulación de biomasa y peso fresco (Jaramillo *et al*., 2012).

CONCLUSIONES

Las dosis de zeolita evaluadas en el presente estudio no mejoraron las características productivas ni morfológicas del fruto de tomate bajo las condiciones de invernadero en las que se desarrolló el experimento. Los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas entre tratamientos para peso, diámetro polar y diámetro ecuatorial ($p < 0.001$), observándose que el tratamiento testigo presentó los mayores valores en todas las variables evaluadas.

Los resultados obtenidos contrastan con diversos estudios que reportan beneficios de la zeolita sobre la retención de humedad y la disponibilidad nutrimental del suelo; sin embargo, dichos efectos no se reflejaron en un incremento del tamaño ni del peso del fruto en las dosis utilizadas durante esta investigación. Esto sugiere que la respuesta del cultivo puede depender de factores como la concentración aplicada, las características fisicoquímicas del suelo, las condiciones ambientales y el manejo agronómico.

Asimismo, se observó una fuerte asociación positiva entre el peso del fruto y sus dimensiones físicas, evidenciando que el incremento en los diámetros polar y ecuatorial se relaciona directamente con una mayor acumulación de biomasa. Se recomienda continuar evaluando diferentes dosis y estrategias de aplicación de zeolita, así como realizar estudios complementarios que permitan determinar las condiciones óptimas para su aprovechamiento en sistemas de producción de tomate bajo agricultura protegida.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chaveli, P., Caballero, R., Barroso, R., & Rodríguez, D. (2012). *Uso de la zeolita natural como complemento del abonado orgánico en el cultivo de hortalizas en huertos intensivos*. Centro Agrícola, 39, 69-67.
2. Cordero-Villa, L., Marín-Tinoco, R. I., & Silva-Marrufo, O. (2018). *Producción de composta a base de residuos de orégano (tallo y hoja) en el Municipio de Rodeo. Dgo*. Rev. Desarro. Urbano SustenTable, 4, 17-21.
3. Escobar, H. (2010). *Manual de producción de tomate bajo invernadero*. Editorial Tadeo Lozano.
4. FAO. (2023). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Estadísticas mundiales de producción agrícola*.
5. Hermosillo-Alba, Melisa Concepción, Oscar Sariñana-Aldaco, Reyna Roxana Guillen-Enriquez, Oscar Silva-Marrufo, Dora Ma. Sangerman-Jarquín, y Pablo Preciado-Rangel. (2026). *Influencia Del Extracto De Sargassum Spp. Sobre La germinación Y Actividad Antioxidante De plántulas De Tomate*. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas 17 (2): e4239. https://doi.org/10.29312/remexca.v17i2.4239.

6. Jaramillo Noreña, J. E., Rodríguez, V. P., Gil Vallejo, L. F., García Muñoz, M. C., Clímaco Hío, J., Quevedo Garzón, D., et al. (2012). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).
7. Malesio, R., Ramírez, M., Ceja, E., Gómez, P., & Bueno, A. (2013). *Zeolita natural.* Alternativa *ecológica y económica para la agricultura de temporal en México*. México.
8. Novo Fernández, R., & Costafreda Mustelier, J. L. (2018). *Las zeolitas naturales de México*.
9. Sariñana-Aldaco, O., Garcia-Terrazas, M. I., Preciado-Rangel, P., Silva-Marrufo, Ó., & Lara-Reimers, E. A. (2023). *Agronomic and metabolomic response of melon (Cucumis melo L.) seedlings under the application of high indole-3-acetic acid concentrations*. Biotecnia, 25(3), 16-24. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.1956
10. Silva-Marrufo, O., Ramírez, A. T. O., Sariñana-Aldaco, O., & Marín-Tinoco, R. I. (2025). *Effect of biofortification with iron and zinc on production, accumulation of heavy metals and biomolecules in lettuce*. Revista de la Facultad de Agronomía, 124(1), e153-e153. https://doi.org/10.24215/16699513e153
11. SIAP. (2025). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción agrícola nacional de tomate rojo (jitomate)*.
12. Soca, M., & Lorente, E. (2015). *Efecto de las zeolitas naturales y activadas en la producción de tomate*. Cryobank, 39(1). https://agrotecnia.edicionescervantes.com/index.php/agrotecnia/article/view/250
13. Tlapala Tapia, S. P., & López Salazar, R. *Empleo de zeolita para la calidad y producción de tomate (Solanum lycopersicum L.)*.
14. Toro, F. D. J. C., Benítez, L. M. L., & Herrera, M. I. Á. (2006). *La zeolita en la mitigación ambiental*. Revista Lasallista de Investigación, 3(1), 30-34. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017.
15. Vázquez-Baxcajay, A., Ramírez-Olvera, S. M., Ordaz-Chaparro, V. M., & Apaez-Barrios, W. A. (2025). *La incorporación de zeolita al sustrato aumenta la biomasa radicular de plantas de lechuga*. Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato, 6, 239-247. https://doi.org/10.15174/cia.v6i6.140

ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS HIDROLIZADOS DE LA SEMILLA DE AGUACATE

Sarai Camarena Martínez[1], Juan Humberto Martínez Martínez[2], María de la Luz Arvizu Meza[2], Graciela M.L. Ruiz Aguilar[1]

[1]División Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato; [2]Tecnológico Nacional de México – ITS de Abasolo

s.camarena@ugto.mx

RESUMEN

En el 2024, México lidero como principal productor global alcanzando una producción de 2.76 millones de toneladas lo cual representó el 28.0% del volumen global. Su crecimiento constante está impulsado tanto por la fuerte demanda en los mercados internacionales como por el aumento del consumo nacional. La industria procesadora de aguacate regularmente desecha las semillas lo cual contamina el medio ambiente, no obstante, las semillas de aguacate son ricas en polisacáridos, proteínas, lípidos, vitaminas, minerales y otras sustancias bioactivas, las cuales se pueden aprovechar para la producción de energía renovable. En este estudio se evaluó la digestión anaerobia de hidrolizados de semilla de aguacate a diferentes cargas orgánicas (1000-10,000 mgDQO/L) bajo dos condiciones de temperatura: ambiente (25-30°C) y mesofílica (35°C). Se realizaron ensayos de potencial bioquímico metanogénico (PBM) en sistemas en lote para determinar los rendimientos de biogás y metano, y analizar el comportamiento cinético del proceso. Los resultados mostraron que las mayores producciones se alcanzaron cuando se usaron bajas cargas (1000-2000 mgDQO/L), obteniendo rendimientos alrededor de 1200 ml biogás/gDQO y 400 ml CH_4/gDQO acumulados. En contraste, las concentraciones superiores de DQO (>5000 mg/L) presentaron inhibición significativa, atribuida a la acumulación de ácidos grasos volátiles, amonio y compuestos fenólicos. La temperatura influyó de manera decisiva: las condiciones mesofílicas favorecieron la conversión del sustrato y la cinética del proceso, mientras que la temperatura ambiente reflejó la aclimatación microbiana, aunque con menor estabilidad en altas cargas. Estos hallazgos confirman que la semilla de aguacate es un sustrato viable para la producción de biogás y metano, siempre que se controle la carga orgánica, y resaltan su potencial como alternativa sostenible para la valorización de residuos agroindustriales y la generación de energía renovable.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de fuentes de energía sostenibles ha impulsado el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar los residuos orgánicos como materia prima para la generación de biocombustibles. Entre estas tecnologías, la digestión anaerobia se ha consolidado como una alternativa eficiente y ambientalmente amigable para la producción de biogás, un recurso energético renovable compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Dhungana et al., 2022). Esta tecnología no solo permite la generación de energía, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la valorización de residuos agroindustriales (Caballero et al., 2023; Bangar et al., 2022).

Actualmente, la producción de energía a partir de biogás en México es mínima dentro del balance energético nacional. Según el Balance Nacional de Energía 2023, publicado por la Secretaría de Energía (SENER, 2023), la generación de energía primaria mediante biogás fue de apenas 2.15 PJ, lo que representa solo el 0.03 % del total nacional.

A pesar del alto potencial del biogás como fuente de energía renovable, su incorporación en la matriz energética nacional continúa siendo limitada. Esta subutilización persiste incluso frente a la considerable generación de residuos orgánicos en el país. De acuerdo con el Diagnóstico Básico

para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR), en el 2020, el país generó diariamente más de 106,000 toneladas de residuos sólidos urbanos.

En México, el aguacate es uno de los principales productos de exportación del país, y en 2024, se produjo 1.2 millones de toneladas (SIAP, 2024). La industria de procesamiento de aguacate genera grandes cantidades de semillas como subproducto, las cuales constituyen del 20% al 30% del material procesado (Caballero et al., 2023). Esto se refleja en un incremento significativo del volumen total de desechos y agrava el impacto ambiental asociado a su disposición inadecuada, tanto en zonas urbanas como rurales. No obstante, el alto contenido lignocelulósico de las semillas de aguacate limita su biodegradabilidad directa en sistemas anaerobios, por ello la aplicación de pretratamientos como la hidrólisis resulta fundamental para solubilizar los carbohidratos complejos y liberar azucares fermentables (Bangar et al., 2022; Sunar et al., 2025).

Borja y Goetschel (2022) realizaron una caracterización fitoquímica y proximal de los subproductos del aguacate (incluyendo cáscara, pulpa y semilla), destacando el alto contenido de almidones, compuestos fenólicos y otros biocompuestos con potencial agroindustrial. Esta afirmación se ve respaldada por el estudio experimental de Kenasa y Kena (2019). En su estudio se evaluó la producción de biogás a partir de la codigestión anaerobia de cáscara de aguacate con excreta de ave y estiércol de vaca, mediante un diseño experimental que contempló siete combinaciones distintas de sustratos. El experimento se llevó a cabo en condiciones mesofílicas (25 °C) con un pH inicial ajustado a 7.0. Entre los tratamientos evaluados, la mezcla compuesta por 75 % de cáscara de aguacate y 25 % de excreta de ave, presentó el mejor rendimiento, generando 453.5 ± 0.5 mL de biogás en solo cuatro días. Las formulaciones con excreta de ave mostraron una cinética de producción más rápida, mientras que las que contenían estiércol de vaca produjeron biogás de forma más lenta pero sostenida. Este estudio pone de manifiesto el potencial energético de los residuos orgánicos del aguacate, especialmente al ser codigeridos con fuentes nitrogenadas.

Sin embargo, en muchos casos no es posible llevar a cabo la codigestión de subproductos del aguacate con estiércol de animales. En este contexto, un pretratamiento podría permitir la revalorización de estos residuos considerándose como una etapa crítica para mejorar la accesibilidad enzimática y la eficiencia de conversión a biogás (Sunar et al., 2025). Por lo que en el presente trabajo se propone evaluar el rendimiento en la producción de biogás a partir de hidrolizados obtenidos de la semilla de aguacate, mediante la implementación del ensayo del Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Debido a su alto contenido de azúcares solubles y nutrientes esenciales, los hidrolizados de semilla de aguacate pueden actuar como un sustrato eficiente para la digestión anaerobia, mejorando las etapas iniciales del proceso y favoreciendo la producción de metano. Este estudio busca contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles para la gestión de residuos agroindustriales, promoviendo el uso de tecnologías limpias y el aprovechamiento energético de subproductos agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección del sustrato e inóculo

El sustrato utilizado en este estudio fue un hidrolizado de semilla de aguacate, proporcionado por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV). Este material fue previamente sometido a un proceso de hidrólisis para facilitar su biodegradación, lo que lo convierte en una fuente rica en compuestos fermentables con potencial para la producción de biogás. El inóculo fue recolectado de un biodigestor alimentado regularmente con estiércol vacuno y ovino ubicado en el Instituto Tecnológico Superior de Abasolo (ITESA).

Medición de Demanda Química de Oxígeno

La caracterización del sustrato se realizó mediante la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), conforme al método APHA 5220 Chemical Oxigen Demand (COD), con el objetivo de cuantificar la concentración total de materia orgánica presente en las muestras, expresada como

la cantidad de oxígeno necesario para su oxidación completa a dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Este análisis se fundamenta en la capacidad de agentes oxidantes fuertes, como el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), para oxidar compuestos orgánicos en medio ácido (APHA, 2005).

La DQO permitió estimar la carga orgánica disponible y establecer las condiciones iniciales del ensayo. A partir del valor de DQO obtenido, se prepararon siete diluciones con concentraciones aproximadas de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7500 y 10000 mg DQO/L, con el objetivo de evaluar el comportamiento metanogénico del sustrato en función de la carga aplicada.

Condiciones de operación de los reactores

Los ensayos de biodigestión se realizaron en viales de vidrio herméticos de 120 ml de capacidad, cada uno con un volumen de trabajo de 80 ml, de los cuales 64 ml (80%) correspondían al sustrato (hidrolizado de semilla de aguacate) y 16 ml (20%) al inóculo proveniente de digestores anaerobios estabilizados, como se muestra en la Figura 1. Cada vial contaba con un espacio de cabeza de 40 ml, suficiente para la acumulación de biogás, permitiendo su posterior análisis. Antes de su incorporación en los viales, el pH de cada dilución fue ajustado a 7.0 mediante la adición de bicarbonato de sodio, con el fin de establecer condiciones iniciales óptimas para la actividad metanogénica (Schievano et al., 2009).

Se estudió la influencia de la temperatura en la producción de biogás mediante la modificación de las condiciones térmicas del proceso. A temperatura controlada (35 °C), se prepararon tres réplicas por cada concentración en las diluciones de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7500 y 10000 mgDQO/L. y a temperatura ambiente (aproximadamente 25-30 °C), se utilizó el mismo diseño experimental, con tres réplicas por concentración, pero manteniéndolas sin control térmico.

Esta estrategia permitió comparar el comportamiento metanogénico del sustrato bajo dos regímenes térmicos, manteniendo constante la relación S/I, el volumen de trabajo y el pH inicial. Las condiciones operativas fueron seleccionadas en función de la disponibilidad de equipamiento y siguiendo recomendaciones metodológicas establecidas por la guía técnica del INTA (Bres, Beily & Crespo, 2022).

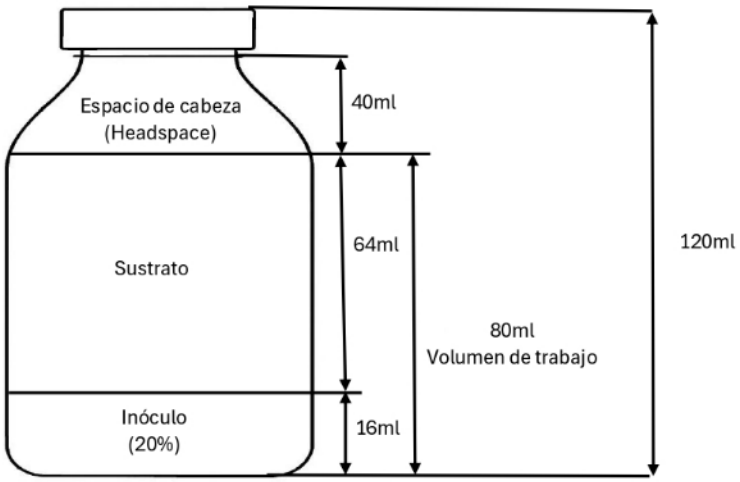


Figura 1. Distribución volumétrica en los viales de biodigestión anaerobia utilizados en los ensayos PBM.

Con el objetivo de validar la actividad metanogénica del inóculo y asegurar la confiabilidad del sistema de digestión anaerobia, se incluyó un control positivo compuesto por glucosa disuelta en

agua desionizada. Este control se preparó en un vial con espacio de cabeza y un volumen de trabajo de 80 ml, manteniendo la misma proporción volumétrica que los viales experimentales: 64 ml (80%) de solución de glucosa en agua desionizada y 16 ml (20%) de inóculo anaerobio previamente estabilizado.

El vial de control fue incubado a temperatura controlada de 35 °C, condición óptima para microorganismos mesofílicos, tal como se recomienda en protocolos estandarizados como el de Angelidaki y Sanders (2004). La glucosa, al ser un compuesto fácilmente biodegradable, permite verificar la eficiencia del inóculo y sirve como referencia para comparar la cinética de producción de metano frente a sustratos de mayor complejidad como el hidrolizado de semilla de aguacate. La inclusión del control con glucosa es consistente con las recomendaciones metodológicas de la guía técnica del INTA (Bres, Beily & Crespo, 2022).

Medición de volumen de biogás

La medición del volumen de biogás se realizó mediante el método de desplazamiento de agua con bureta invertida, siguiendo criterios de simplicidad, precisión y compatibilidad con las condiciones reales del laboratorio. Este método ha sido validado en estudios previos de PBM por su capacidad de generar datos reproducibles (Angelidaki et al., 2004; Raposo et al., 2012).

Método de cuantificación de metano

Para determinar la fracción de metano presente en el biogás generado, se utilizó la técnica de cromatografía de gases empleando un Cromatógrafo Thermo Scientific modelo TRACE1300, equipado con un TCD (Detector de Conductividad Térmica por sus siglas en inglés) y una columna empacada. Esta técnica permite diferenciar y cuantificar específicamente el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros componentes menores del biogás. Las muestras de gas fueron recolectadas directamente desde el sistema de digestión mediante jeringas herméticas, y posteriormente inyectadas en el cromatógrafo equipado con un detector de conductividad térmica (TCD). El equipo fue calibrado previamente con estándares de metano puro, asegurando la confiabilidad de los resultados obtenidos. La cromatografía de gases es recomendada por protocolos internacionales como VDI 4630 y ha sido validada en estudios interlaboratorio como el de Raposo et al. (2011), donde se destaca su capacidad para evaluar con precisión el rendimiento metanogénico de diversos sustratos orgánicos.

Procesamiento de datos

Durante el desarrollo experimental, los datos de producción acumulada de biogás y metano fueron registrados sistemáticamente en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Posteriormente, se utilizó el software SigmaPlot versión 14.5 para la elaboración de las curvas de acumulación de biogás y metano. Para describir la cinética de producción de metano, se aplicó el modelo de Gompertz modificado, ampliamente utilizado en estudios de potencial bioquímico de metano (PBM) por su capacidad para representar procesos sigmoides típicos de la digestión anaerobia.

Este modelo fue ajustado a los datos experimentales mediante regresión no lineal en SigmaPlot, obteniendo parámetros cinéticos que permiten comparar el comportamiento de cada dilución del sustrato. La calidad del ajuste se evaluó mediante el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio (RMSE), asegurando la validez estadística de los resultados. El modelo de Gompertz se expresa matemáticamente como:

$$\boldsymbol{P(t) = P_{max} * exp\left(-exp\left(\frac{R_{max} * e}{P_{max}}(\lambda - t) + 1\right)\right)}$$

Donde:

$\boldsymbol{P(t)}$= Producción acumulada de biogás o metano en el tiempo (ml/gDQO o ml/gSV)

$\boldsymbol{P_{max}}$= Producción máxima potencial (ml/gDQO)

$\boldsymbol{R_{max}}$= Tasa máxima de producción (ml/gDQO*h)

$\boldsymbol{\lambda}$= Tiempo de retardo (lag pase), antes de que comience la producción significativa (h)

$\boldsymbol{e}$= Numero de Euler (2.718)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación cinética del sistema a temperatura mesofílica (35°C)

La producción máxima potencial de metano en las condiciones de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 7500 y 10000 mg DQO/L a 35°C fueron 74.31, 22.45, 24.72, 28.43, 28.9, 9.8 y 12.61 ml/gDQO, respectivamente. Mientras que la tasa máxima de producción de biogás a las concentraciones de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7500 y 10000 mg DQO/L fueron 134.88, 107.56, 86.81, 118.96, 153.61, 25.0 y 26.7 ml/gDQO, respectivamente. En las concentraciones de 7500 y 10000 mg DQO/L se presentó una inhibición significativa del proceso metanogénico, posiblemente asociada a la acumulación de compuestos tóxicos derivados del sustrato (Figura 2).

Evaluación cinética del sistema bajo condiciones ambientales (25-30 °C)

La producción máxima potencial de metano en las condiciones de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 7500 y 10000 mgDQO/L a 35°C fueron 63.80, 198.95, 29.8, 104.02, 104.49, 15.47 y 22.14, ml/gDQO, respectivamente. Mientras que la tasa máxima de producción de biogás a las concentraciones de 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 7500 y 10000 mg DQO/L fueron 101.40, 102.92, 158.55, 225,68, 238.43, 19.59 y 27.39 ml/gDQO, respectivamente (Figura 3).

Al igual que en las condiciones de temperatura controlada, se presentó una inhibición significativa del proceso metanogénico en las concentraciones de 7500 y 10000 mg DQO/L probablemente por la acumulación de compuestos tóxicos derivados del sustrato.

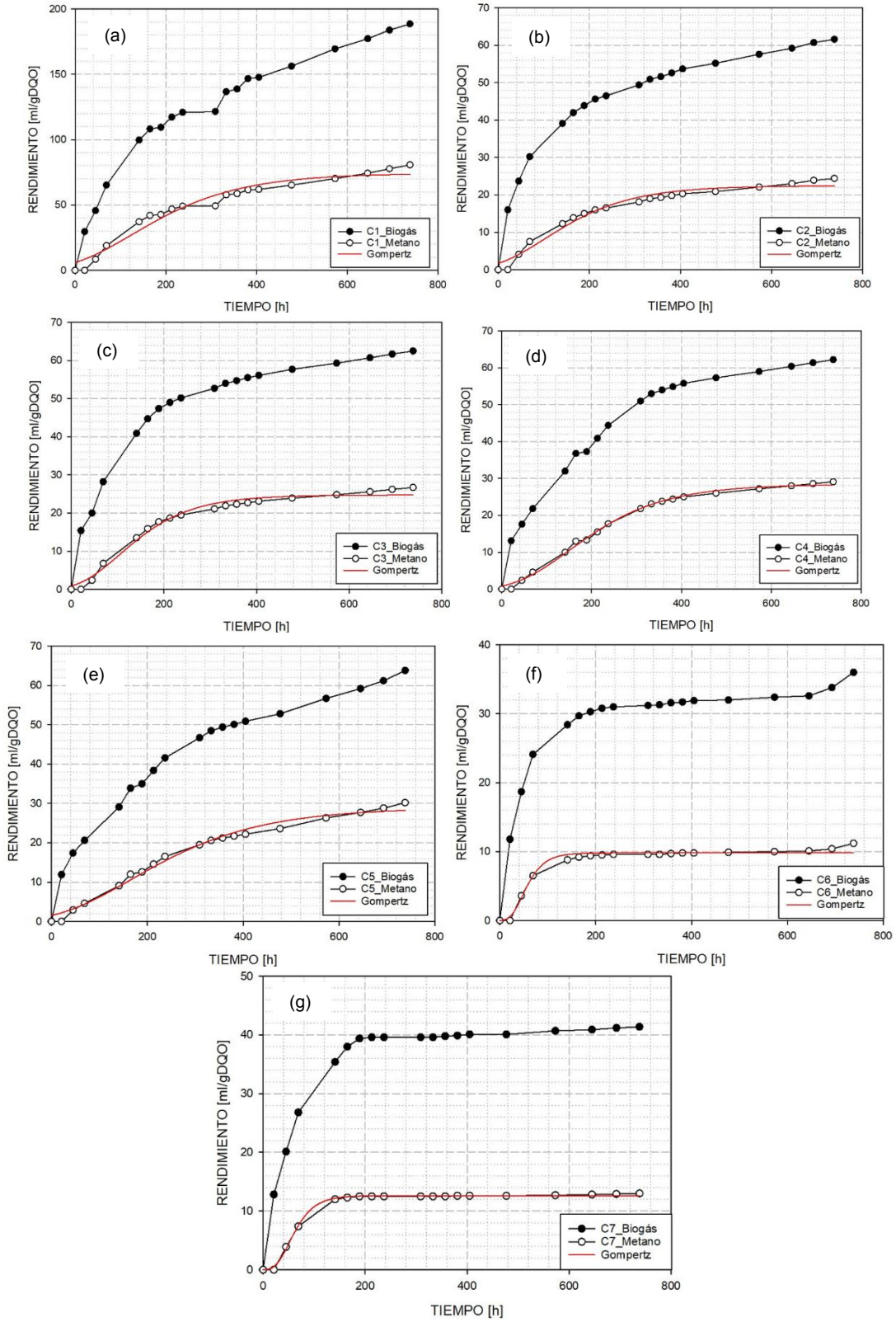


Figura 2. Producción acumulada de biogás y metano para la concentración de 1000 (a), 2000 (b), 3000 (c), 4000 (d), 5000 (e), 7500 (f), 10000 (g) mgDQO/L a 35°C.

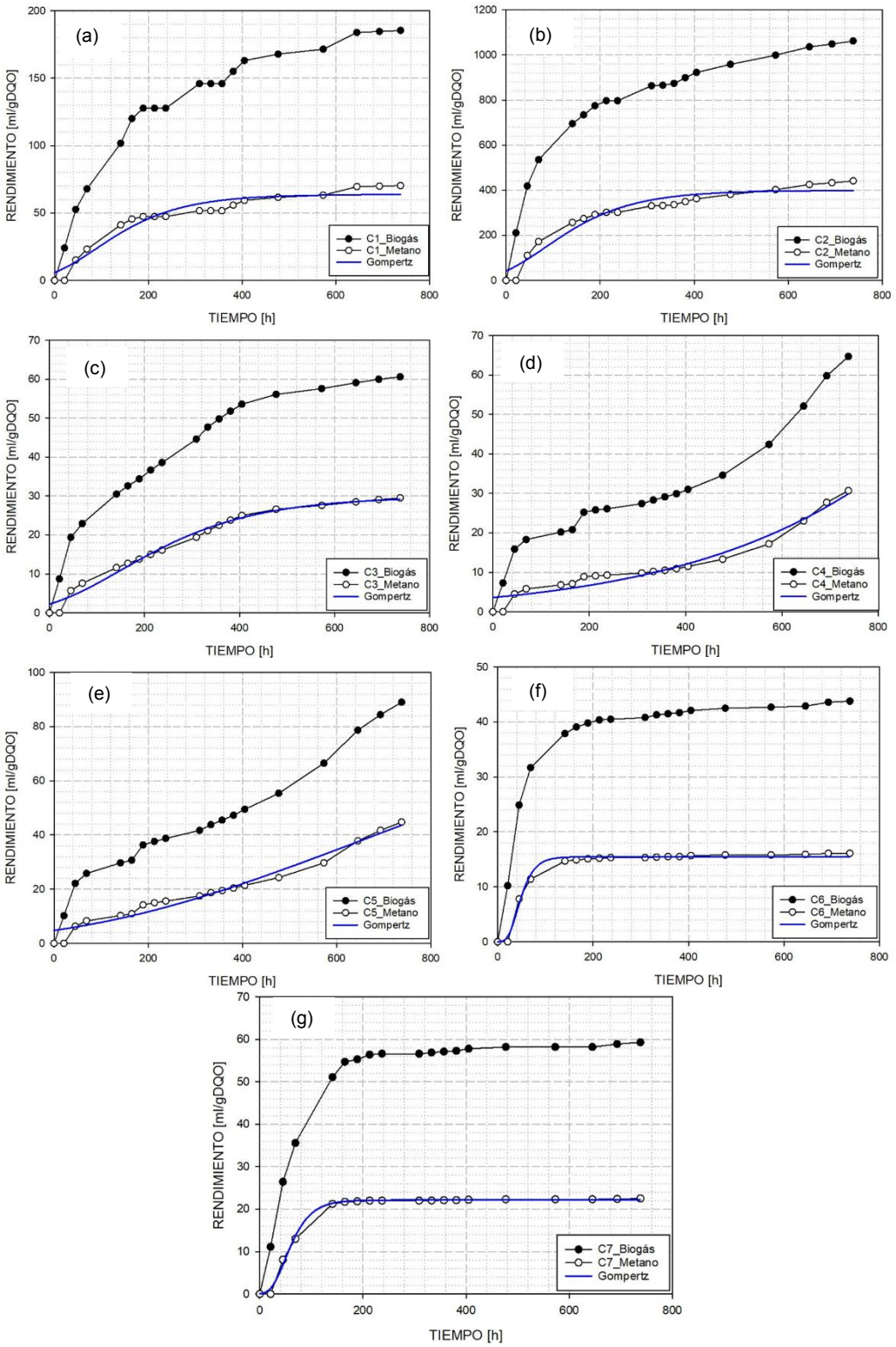


Figura 3. Producción acumulada de biogás y metano para la concentración de 1000 (a), 2000 (b), 3000 (c), 4000 (d), 5000 (e), 7500 (f), 10000 (g) mgDQO/L en condiciones ambientales (25-30 °C).

Efecto de la temperatura en la producción de biogás y metano

La temperatura de operación es uno de los factores más determinantes en la digestión anaerobia. En este estudio, a 35°C se observó una cinética más definida, con fases de adaptación cortas y pendientes pronunciadas en bajas cargas (1000-2000 mgDQO/L), lo que refleja una mayor eficiencia en la conversión del sustrato. Esto concuerda con lo señalado por Horváth et al (2016) y Raposo et al. (2012), quienes destacan que las condiciones mesofílicas favorecen la actividad enzimática y la degradación de compuestos complejos, incrementando la producción de metano. Sin embargo, en altas concentraciones (>5000 mgDQO/L) la producción disminuyo drásticamente, estabilizándose en valores bajos debido a la acumulación de compuestos inhibidores. De manera similar, bajo temperatura ambiente (25-30°C), el sistema mostró buena adaptación inicial en bajas cargas, aunque con menor estabilidad en altas concentraciones. Este comportamiento coincide con lo reportado por Dhungana et al. (2022), quienes observaron que la digestión a temperatura ambiente puede ser viable, pero presenta limitaciones en la estabilidad del proceso frente a sobrecargas.

Efecto de la carga orgánica

El incremento de la carga orgánica tuvo un impacto directo en el rendimiento. En el rango de 1000-2000 mgDQO/L, se alcanzaron los mayores valores de producción de biogás y metano, lo que indica un equilibrio entre disponibilidad de sustrato y capacidad de degradación microbiana. A partir de 3000 mgDQO/L, se observó una disminución progresiva en el rendimiento, y en concentraciones superiores a 5000 mgDQO/L se presentó inhibición marcada.

Este fenómeno ha sido ampliamente documentado: Angelaki y Sanders (2004) y Labatut et al. (2011) señalan que la acumulación de ácidos grasos volátiles y amonio en condiciones de sobrecarga limitan la eficiencia metanogénica, Asimismo, Andriamanohiarisoamanana et al. (2020) destacan que la codigestión o el ajuste de cargas puede mejorar la estabilidad del proceso y reducir riesgos de inhibición.

Los hallazgos de este trabajo coinciden con investigaciones en residuos agroindustriales. Por ejemplo, Kenasa y Kena (2019) reportaron que los subproductos del aguacate presentan potencial para la producción de biogás, aunque requieren un control cuidadoso de las condiciones de operación. Asimismo, Ávila et al. (2023) y Bangar et al. (2022) destacan que la semilla de aguacate contiene compuestos fenólicos y lignocelulósicos que pueden limitar la biodegradabilidad, lo que explica la inhibición observada en altas cargas. Por otro lado, Vintila et al., 2019 emplearon la semilla de aguacate pretratada térmicamente en autoclave con solución NaOH 1% por 10 minutos y mediante hidrolisis enzimática a pH 5, 50 °C por 48 horas. Lograron obtener un rendimiento de biogás de 214.2 Nml/g. Si bien, ellos llevaron a cabo el proceso a una temperatura controlada de 37 °C obtuvieron resultados similares con respecto al presente estudio.

De manera complementaria, Espinosa et al. (2021) y Sunar et al. (2025) señalan que el pretratamiento de biomasa lignocelulósica puede mejorar la accesibilidad del sustrato y, por ende, la producción de metano.

CONCLUSIONES

Los resultados sugieren que el hidrolizado de semilla de aguacate es un sustrato viable para la producción de biogás y metano, siempre que se controle la carga orgánica. El rango óptimo identificado (1000-2000 mgDQO/L) permite maximizar la eficiencia del proceso, mientras que concentraciones superiores deben evitarse para prevenir la inhibición atribuible a la acumulación de ácidos grasos volátiles, amonio y compuestos fenólicos.

La operación bajo condiciones mesofílicas controladas ofrece ventajas cinéticas y mayor eficacia en bajas cargas, mientras que la operación a temperatura ambiente puede ser una alternativa viable en contextos de bajo costo energético, aunque con limitaciones en la estabilidad del proceso.

Estos hallazgos son relevantes en el contexto mexicano, donde la producción de aguacate genera grandes volúmenes de residuos. Su aprovechamiento energético representa una alternativa sostenible que contribuye a la gestión integral de residuos y a la transición hacia energías renovables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andriamanohiarisoamanana, F. J., Yasui, S., Yamashiro, T., Ramanoelina, V., Ihara, I., & Umetsu, K. (2020). Anaerobic co-digestion: A sustainable approach to food processing organic waste management. Journal of Material Cycles and Waste Management, 22, 1501–1508. https://doi.org/10.1007/s10163-020-01040-3
2. Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 3(2), 117–129. https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3
3. APHA, (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. APHA, Washington, DC.
4. Ávila, M., Torres, J., Ramírez, L., & Gómez, F. (2023). Propiedades composicionales, estructurales y fisicoquímicas de las semillas de aguacate y sus potenciales usos agroindustriales. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/369766501
5. Bangar, S. P., Dunno, K., Dhull, S. B., Siroha, A. K., Changan, S., Maqsood, S., & Rusu, A. V. (2022). Avocado seed discoveries: Chemical composition, biological properties, and industrial food applications. Food Chemistry: X, 16, 100507. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100507
6. Borja Espín, D., & Goetschel Gómez, M. L. (2022). Subproductos del aguacate (Persea americana) Hass y Fuerte: estudio fitoquímico y proximal. En T. Mosquera (Ed.), Productos naturales: investigación y perspectivas en Ecuador (pp. 29–50). Editorial Abya-Yala. https://doi.org/10.7476/9789978108260.0003
7. Bres, P. A., Beily, M. E., & Crespo, D. (2022). Ensayo potencial bioquímico metanogénico: Una metodología clave para conocer la energía de las biomasas. Ediciones INTA. https://www.researchgate.net/publication/359231717_Ensayo_potencial_bioquimico_metanogenico_Una_metodologia_clave_para_conocer_la_energia_de_las_biomasas
8. Caballero Sánchez, L., Lázaro Mixteco, P. E., & Castro Montoya, A. J. (2023, diciembre 20). La semilla de aguacate, un desecho para la producción de biocombustible. C+Tec, Núm. 1. Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán. https://ctecicti.com/index.php/CTec/article/view/147
9. Dhungana, B., Lohani, S. P., & Marsolek, M. (2022). Anaerobic co-digestion of food waste with livestock manure at ambient temperature: A biogas-based circular economy and sustainable development goals. Sustainability, 14(6), 3307. https://doi.org/10.3390/su14063307
10. Dhungana, B., Lohani, S. P., & Marsolek, M. (2022). Anaerobic co-digestion of food waste with livestock manure at ambient temperature: A biogas-based circular economy and sustainable development goals. Sustainability, 14(6), 3307. https://doi.org/10.3390/su14063307
11. Espinosa Negrín, T., Martínez, A., & Rojas, D. (2021). Pretratamiento y codigestión anaerobia de biomasa lignocelulósica: avances recientes. Current Research in Environmental Sustainability, 3, 100126. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X2500115X
12. Horváth, I. S., Tabatabaei, M., Karimi, K., & Kumar, R. (2016). Recent updates on biogas production – A review. Biofuel Research Journal, 3(2), 463–473. https://doi.org/10.18331/BRJ2016.3.2.4
13. Kenasa, G., & Kena, E. (2019). Optimization of biogas production from avocado fruit peel wastes co-digestion with animal manure collected from juice vending house in Gimbi Town, Ethiopia. Fermentation Technology, 8(1), 1–6. https://doi.org/10.4172/2167-7972.1000153
14. Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. Bioresource Technology, 102(3), 2255–2264. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035
15. Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental

procedures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 861–877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008

16. Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De la Rubia, M. A., & Borja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 861–877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008
17. Schievano, A., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Malagutti, L., Gozzi, A., & Adani, F. (2009). Prediction of biogas potentials using quick laboratory analyses: Upgrading previous models for application to heterogeneous organic matrices. Bioresource Technology, 100(23), 5777–5782. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.075
18. Secretaría de Energía (SENER). (2025). Balance Nacional de Energía 2023. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Planeación e Información Energéticas. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/977268/Balance_Nacional_de_Energ_a_2023.FINAL06.02.2025.1.pdf
19. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024, 15 de agosto). Escenario mensual de productos agroalimentarios: Aguacate. Dirección de Análisis Estratégico. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/
20. Sunar, S. L., Kumara, M. K., Oruganti, R. K., Khadka, K. K., Panda, T. K., & Bhattacharyya, D. (2025). Pretreatment and anaerobic co-digestion of lignocellulosic biomass: Recent developments. Bioresource Technology Reports, 30, 102133. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102133
21. Vintila, T., Ionel, I., Tiegam, R. F. T., Wächter, A. R., Julean, C., & Gabche, A. S. (2019). Residual biomass from food processing industry in Cameroon as feedstock for second-generation biofuels. BioResources, 14(2), 3731-3745. https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3731-3745

EFECTO DE LA EDAD EN EL DESARROLLO *IN VITRO* DE EMBRIONES PARTENOGENÉTICOS DE GATA DOMÉSTICA

Silvana García Chávez [1], José Roberto Vázquez Avendaño [2], Juan Manuel Quezadas Fuentes [2], Alfredo Trejo Córdova [2], Demetrio Alonso Ambriz García [2] y María del Carmen Navarro Maldonado. [2]

[1] Licenciatura en Biología [2] Departamento de Biología de la Reproducción, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana.
cbs2212020170@izt.uam.mx

RESUMEN

Para establecer estrategias para la conservación de felinos silvestres en riesgo de extinción, la reproducción animal asistida aplica metodologías *in vitro* para conocer el desempeño fisiológico de ovocitos y embriones, utilizando modelos animales emparentados, como son los felinos domésticos (*Felis catus*). Ello debido a la disponibilidad de ovarios de gatas de los centros de esterilización, para este caso, de la Alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la edad en la producción de embriones partenogenéticos en gata doméstica. Se evaluaron dos grupos de gatas según su edad: gatas jóvenes de menos de 6 meses de edad (<6M) y adultas de más de 6 meses de edad (>6M). Los ovarios fueron colectados y lavados en sol. salina isotérmica al 0.9% con antibióticos, durante los meses de junio a noviembre de 2025. En el laboratorio, los ovocitos se obtuvieron de los ovarios mediante cortes seriadosy se maduraron *in vitro* (MIV) en TCM-199 suplementado con hormonas y EGF, durante 36 h a 38.5 °C y 5% de CO_2 en humedad a saturación. La tasa de MIV se determinó por la presencia del primer cuerpo polar. Una N = 18 ovocitos madurados de cada grupo, fueron activados por 5 min en ionóforo de calcio (8 µg/mL) y 4 h en 6- dimetilaminopurina (6-DMAP 2 mM), a las condiciones descritas. Posteriormente fueron cultivados para su desarrollo *in vitro* (DIV) en 50 µL de medio BO-IVC (Biosciences) bajo aceite a 38.5°C y 5% de CO 2 en humedad a saturación, durante 7 días. Se evaluó la tasa de DIV a las 96 y 168 h de cultivo. Los resultados mostraron que, a las 96 h la tasa de segmentación fue del 100% en ambos grupos, mientras que a las 168 h la tasa de blastocistos fue de 49.05%±8.61 para <6M, vs. 47.6%±4.1 para >6M, sin diferencias estadísticas (p=0.42). Se concluye que la edad no influye en el DIV de embriones partenogenéticos de gata doméstica.

TEÓRIA

Para establecer estrategias para la conservación de felinos silvestres en riesgo de extinción, la reproducción animal asistida aplica metodologías *in vitro* para conocer el desempeño fisiológico de ovocitos y embriones, utilizando modelos animales emparentados, como son los felinos domésticos (*Felis catus*) (Veraguas, 2018). Ello debido a la disponibilidad de ovarios de gatas de los centros de esterilización, para este caso, de la Alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México.

La producción *in vitro* de embriones comprende diferentes etapas sistemáticas tales como la colecta de ovarios, selección de complejos cúmulo ovocitos (COC), maduración *in vitro* (MIV), fertilización *in vitro* (FIV), la transferencia nuclear de células somáticas (TNCS) o clonación, y el desarrollo embrionario *in vitro*.

El ovocito, por sí mismo, tiene los elementos necesarios para comenzar el desarrollo embrionario temprano sin la fertilización por parte del espermatozoide (Torres, 2024). A este fenómeno se le conoce como partenogénesis, el cual se presenta en diferentes especies, tales como insectos, peces, reptiles y mamíferos. En estos últimos, se da el desarrollo embrionario preimplantacional sin que progrese más allá de esta etapa. La activación de la mayoría de los ovocitos de mamíferos se logra mediante el empleo de agentes químicos, físicos o mecánicos. Los agentes químicos funcionan activando la cascada de señalización que se activa de manera natural durante la fertilización del espermatozoide. En cuanto a los agentes físicos, pueden ser mediante estímulos eléctricos y,

finalmente, los agentes mecánicos se refieren a la manipulación de los ovocitos que pueden activar la cascada de señalización para la activación (Veraguas, 2018).

La generación de embriones partenogenéticos se emplea comúnmente como control de cultivos *in vitro* de embriones. Sin embargo, puede servir también como un modelo para estudiar el gameto femenino. Los embriones partenogenéticos se usan para examinar las condiciones de MIV y del desarrollo embrionario preimplantacional previo a experimentos de FIV o clonación, de esta manera, se asegura que los medios, reactivos y equipos funcionen correctamente. También se pueden emplear para estandarizar nuevas técnicas en las que se requiera una cantidad considerable de embriones (Veraguas, 2018). La edad de las hembras para procesos de reproducción asistida es fundamental, así como su condición fisiológica, si bien a través de técnicas sofisticadas ha sido posible obtener éxito reproductivo (gestaciones y crías nacidas vivas), de hembras en edades muy tempranas (prepúberes), así como de edades avanzadas (añosas), esto ha implicado casos y tratamientos especiales con riesgos de moderados a altos para la madre y las crías, aunque no por ello debe ser aplicado de manera amplia, por lo que, el conocer las condiciones más adecuadas para aplicar la reproducción asistida y en este caso, la evaluación del desempeño de los ovocitos para su activación y desarrollo embrionario (T. da Silva, et al., 2010) a partir de gatas de edades diferentes es fundamental. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la edad en la producción de embriones partenogenéticos en gata doméstica.

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención y transporte de ovarios.
Se evaluaron dos grupos de gatas según su edad: gatas prepúberes de menos de 6 meses de edad (<6M) y adultas de más de 6 meses de edad (>6M). Los ovarios se obtuvieron por ovariohisterectomía en las jornadas de esterilización de la Alcaldía Iztapalapa en la Ciudad de México. Se lavaron en sol. salina isotérmica al 0.9% con antibióticos (penicilina y gentamicina) y fueron transportados al laboratorio a temperatura ambiente para su procesamiento.

Recuperación y selección de ovocitos.
La obtención de los complejos cúmulo ovocitos (COC) se realizó mediante cortes seriados. Tras hacer los cortes, los ovarios se lavaron en TCM-199 con HEPES suplementado con heparina. Posteriormente, se colectaron los COC bajo microscopio estereoscópico y se clasificaron de acuerdo con su morfología y el número de capas de células de la granulosa que los rodeaban.

Se seleccionaron únicamente ovocitos de calidad I y II, caracterizados por presentar un citoplasma homogéneo y varias capas compactas de células del cúmulo (Wood y Wildt, 1997). Los ovocitos con signos de degeneración o con cúmulo incompleto fueron descartados.

Maduración *in vitro*.
Los COC seleccionados fueron colocados en 500 μL de medio de maduración (TCM-199, 0.3% BSA-Fracción V, 0.36 mM piruvato, 2.0 mM glutamina, 10 ng/mL EGF, 50 μg/mL gentamicina, 1 μg/mL 17-B estradiol, 2.2 mM lactato de calcio y 0.1 UI FSH-LH) a 38 °C y 5% de CO_2 en aire durante 36 horas (Veraguas *et al.,* 2018).

Activación partenogenética.
Una vez concluido el periodo de cultivo, los COC fueron colocados en un tubo Eppendorf con 500 μL de hialuronidasa 0.5 mg/mL a 38 °C, y se realizó pipeteo suave para desprender las células del cúmulo del ovocito. Los ovocitos que presentaron primer cuerpo polar fueron considerados maduros y seleccionados para la activación partenogenética. La activación se realizó mediante exposición a ionóforo de calcio, durante cinco minutos, posteriormente los ovocitos fueron incubados durante cuatro horas en medio fresco, suplementado con 6-dimetilaminopurina (6-DMAP) a una concentración final de 2 mM.

Una vez concluido el tratamiento, los ovocitos fueron lavados tres veces y transferidos a una gota de 50 μL de medio de desarrollo (BO-IVC, Bioscience). Los ovocitos activados fueron cultivados durante siete días bajo condiciones controladas de temperatura y atmósfera (38 °C y 5% de CO_2 en aire).

Evaluación embrionaria.
Al finalizar el periodo de cultivo, los presuntos embriones fueron fijados en paraformaldehído al 4%. Posteriormente se montaron en portaobjetos y se tiñeron utilizando DAPI.

La evaluación del desarrollo embrionario se realizó mediante microscopía de epifluorescencia (460nm) registrando el número de embriones divididos y de blastocistos obtenidos en cada grupo experimental.

Análisis de resultados.
Los resultados se expresaron como porcentaje de embriones divididos y blastocistos respecto al número total de ovocitos activados. Las proporciones de blastocistos obtenidas entre grupos experimentales se compararon mediante la prueba exacta de Fisher. Se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando $p < 0.05$.

RESULTADOS

Se activaron partenogenéticamente un total de 57 ovocitos maduros obtenidos de gatas domésticas pertenecientes a ambos grupos de edad. Del total de ovocitos activados, 26 correspondieron a gatas menores de 6 meses y 31 a gatas mayores de 6 meses.

La activación permitió que todos los ovocitos iniciaran división celular, observándose una tasa de segmentación del 100% en ambos grupos experimentales. Sin embargo, se detectaron diferencias importantes en la capacidad para alcanzar la etapa de blastocisto.

En el grupo de gatas menores de 6 meses únicamente un embrión alcanzó el estadio de blastocisto, representando una tasa de desarrollo de 3.58 ± 0.6%. En contraste, el grupo de gatas mayores de 6 meses produjo 13 blastocistos, correspondientes a una tasa de desarrollo de 41.94 ± 5.1% (Tabla 1).

Tabla 1. Desarrollo *in vitro* de embriones partenogenéticos de gata doméstica según la edad de la donadora.

GRUPO	N	DIVIDIDOS N (%± DE)	BLASTOCISTOS N (%± DE)
< 6 MESES	26	26 (100 ± 0.0)	1 (3.85 ± 0.6)
>6 MESES	31	31 (100 ± 0.0)	13 (41.94 ± 5.1)

El estadístico reveló que la tasa de blastocistos obtenida con ovocitos provenientes de gatas mayores de 6 meses, fue significativamente superior a la observada en el grupo prepúber ($p < 0.05$). Los blastocistos obtenidos presentaron una morfología compatible con embriones en desarrollo avanzando al séptimo día de cultivo, observándose una organización celular característica de esta etapa embrionaria (Figura 1).

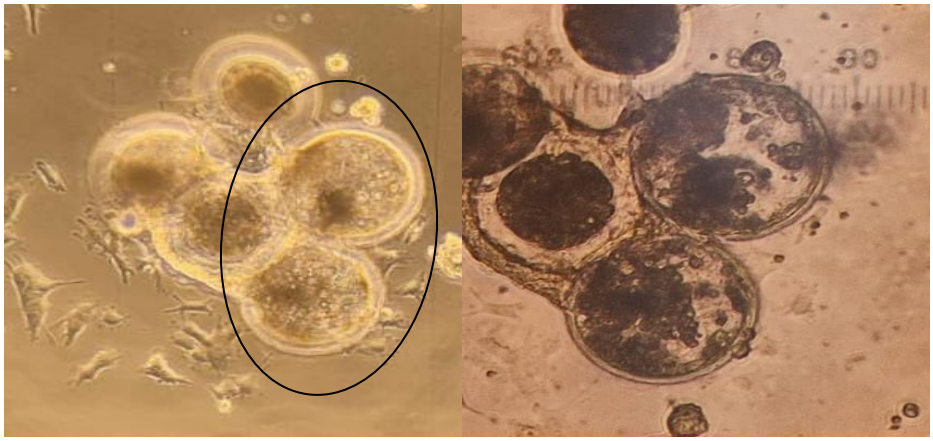


Fig. 1. Blastocistos obtenidos mediante activación partenogenética evaluados a los siete días (40X).

DISCUSIÓN

La activación partenogenética permitió la segmentación del 100% de los ovocitos en ambos grupos, indicando que el protocolo de activación empleado fue eficiente para inducir el reinicio del desarrollo embrionario. Esto es relevante, porque nos da índice de que las condiciones experimentales, aquí utilizadas, abarcando desde la colección de ovarios, transporte al laboratorio, obtención de ovocitos, maduración *in vitro* de éstos y en especial la activación para el desarrollo embrionario, tienen protocolos eficientes. Cabe mencionar que la activación del ovocito para el inicio del desarrollo embrionario implica una serie de procesos fisiológicos de trascendencia que manifiestan que las condiciones de la maduración ovocitaria (membranal, citoplásmica y nuclear) fueron adecuadas, para que la activación química indujera el desarrollo inicial, proceso conocido como segmentación. También es relevante recordar que conforme avanza el estado de desarrollo embrionario, hay diferencias metábolicas muy relevantes, entre ellas, en condiciones de fertilización natural o *in vitro*, el cambio del control genético del proceso de desarrollo embrionario, desde el genoma materno inicialmente, hasta el del genoma embrionario (hacia el estado de 8 blastómeros), el cual no ocurre en un embrión partenogenético por carecer de genoma embrionario producto de la combinación génica de los gametos, sin embargo, al momento de ser inducida la activación del genoma ovocitario (materno) éste permite, con algunas reservas, controlar el proceso de desarrollo embrionario hasta blastocisto, que es la etapa mas avanzada que se alcanza en condiciones estándar *in vitro* (Kemir, te al., 2014).

La mayor tasa de blastocistos aquí obtenida, en gatas adultas, sugiere que la calidad ovocitaria podría ser superior en este grupo, como se ha reportado en estudios previos en felinos domésticos (Veraguas, 2018). Estos resultados coinciden con lo reportado por da Silva *et al.* (2010), quienes obtuvieron desarrollo embrionario tras activación química de ovocitos de gatas. Por su parte. Demir *et al.* (2014) reportaron un 37.14% de ovocitos activados y 12.38% de blastocistos obtenidos mediante tratamiento con 6-DMAP, lo que representa de que 1 de cada tres embriones que inicia segmentación llega, en estas condiciones, a blastocisto, lo cual es coincidente con lo encontrado en el presente trabajo, aunque la eficiencia que se obtuvo en este último fue ligeramente mayor, destacando lo referido con anterioridad, el que las condiciones y protocolos utilizados son adecuados. También es importante reflexionar que dado que el control del desarrollo embrionario está siendo conducido por el genoma materno, puesto que no hay genoma embrionario con la participación génica del gameto complementario (espermatozoide), las eficiencias tienden a ser menores. Pero además recordad que en trabajos de fertilización in vitro, el porcentaje de eficiencia del desarrollo embrionario es inversamente proporcional a las etapas avanzadas del desarrollo y que los menores porcentajes se tiene justamente en estado de blastocisto (Torres, 2024).

En le presente trabajo, se observa que la edad de la hembra donadora influye significativamente en la capacidad de desarrollo *in vitro* de embriones partenogenéticos de gata doméstica, ya que, aunque

todos los ovocitos activados presentaron segmentación embrionaria, los ovocitos provenientes de gatas mayores de 6 meses mostraron una capacidad significativamente superior para alcanzar la etapa de blastocisto en comparación con aquellos obtenidos de gatas menores de 6 meses, lo que pone de manifiesto que la actividad reproductiva, ya sea a través de interacción sexual, gestaciones, partos o lactancias o quizá tan solo por los ciclos ováricos (ovulatorios o no) van mejorando la calidad reproductiva del organismo. Siendo la gata una especie con ovulación condicionada al apareamiento, no la priva de que existan ciclos ováricos para la disposición continua de ovocitos y el crecimiento folicular correspondiente, los cuales, estarán relacionados con la conducta de atractividad y en especial de receptividad sexual, conjuntando así las condiciones fisiológicas idóneas para su éxito reproductivo, el cual considerando la población de gatas en medios urbanos ha sido muy exitosa y pone de manifiesto que conforme madura el organismo, sus gametos tienen mejores condiciones para poder ser utilizados en la procreación. En el presente trabajo la producción de blastocistos en las hembras de más edad fue casi 15 veces mayor que las hembras menores, confirmando lo que se refiere anteriormente.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sugieren que la competencia embrionaria aumenta conforme avanza el desarrollo reproductivo de la hembra, probablemente debido a una mejor calidad citoplasmática y a una mayor maduración ovocitaria.

Asimismo, el protocolo de activación utilizado mediante ionóforo de calcio y 6-DMAP fue eficaz para inducir el desarrollo partenogenético en ovocitos de gata doméstica.

Finalmente, este estudio aporta información relevante para la optimización de protocolos de reproducción asistida y fortalece el uso del gato doméstico como modelo experimental para investigaciones dirigidas a la conservación y manejo reproductivo de felinos silvestres.

BIBLIOGRAFÍA

1. T. da Silva, L. Martins, B. Minto, L. de Sa y L. da Cruz . Parthenogenetic development of domestic cat oocytes treated with ionomycin, cycloheximide, roscovitine and strontium. Theriogenology, Vol 74,4, 2010, pp 596-601.
2. K. Demir, A. Can A., E. Ertürk, S. Ozdemirci, H. Karacam, A. Sandal, y M. Evecen. Effect of different activation techniques on immature and in vitro matured cat oocytes. Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, Vol 20,4. 2014, pp1-13
3. Y. Torres. Viabilidad de las células de la granulosa criopreservadas y la capacidad de enucleación de ovocitos, en gata doméstica (Felis Catus). Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 2024. Tesis de Maestría en BRA. 70 pp
4. Veraguas. Reprogramación de células somáticas de güiña (Leopardus guigna) mediante transferencia nuclear heteroespecífica utilizando ovocitos maduros de gata doméstica (Felissilvestris catus) 2018. Tesis doctoral, Universidad de Concepción, Chile.
5. T. Wood, y D.. Wildt. Effect of the quality of the cumulus–oocyte complex in the domestic cat on the ability of oocytes to mature, fertilize and develop into blastocysts in vitro. Reproduction, Vol 110,2, 1997, pp 355-360.

EVALUACIÓN DE *Sesuvium Portulacastrum* COMO PLANTA FITORREMEDIADORA A LA SALINIDAD EN SUSTRATO COMERCIAL

Rosa Luz Gomez Peraza, Julián Alberto Galaviz Lara, Laura Gabriela Espinosa Alonso, Sergio Medina Godoy, Jesús Uriel Hernández Armenta, Wenceslao Valenzuela Quiñónez, Isabella Estrada Pérez.

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Sinaloa.
rgomezp@ipn.mx

RESUMEN

La salinización de los suelos representa una de las amenazas más críticas, en la producción agrícola, particularmente en zonas áridas y semiáridas. Este problema se agudiza por el cambio climático, el déficit hídrico y prácticas de irrigación inadecuadas, generando un entorno de estrés osmótico y toxicidad iónica que limita el desarrollo de las plantas. En México, la degradación de suelos por exceso de sales solubles demanda soluciones biotecnológicas sostenibles que mitiguen el impacto ambiental y económico. Como alternativa a los métodos fisicoquímicos tradicionales, la fitorremediación emerge como una tecnología de bajo costo y alta eficiencia. Esta técnica aprovecha la capacidad metabólica de ciertas especies vegetales para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes, además de facilitar la extracción de nutrientes y metales pesados en diversos niveles tróficos. Debido a su naturaleza halófita facultativa y su eficiencia en la captura de nutrientes bajo estrés, *Sesuvium portulacastrum* se consolida como una herramienta biotecnológica clave para la fitorremediación. Su desempeño morfológico y nutricional la faculta para procesos de fitoextracción y fitoestabilización, permitiendo la restauración funcional de suelos afectados por salinidad y metales pesados El presente trabajo analiza la respuesta de *Sesuvium portulacastrum* en sustrato zeolita y niveles de salinidad. Para llevar a cabo este estudio se utilizaron esquejes (20 cm) de *Sesuvium portulacastrum* procedentes de las costas de Guasave, Sinaloa, se aclimataron por 15 días posteriormente se colocaron en macetas con sustrato zeolita, con los distintos tratamientos de salinidad: 0 dS/m, 4 dS/m y 8 dS/m. Los análisis foliares se hicieron en el laboratorio siguiendo los protocolos de Alcántar y Sandoval (1999)[1]. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 5 repeticiones. El análisis foliar reveló que *Sesuvium portulacastrum* mantiene una estabilidad homeostática frente a la salinidad. El Nitrógeno (N) mostró valores estables, con un ligero descenso no significativo a 8 dS/m, confirmando la capacidad de esta halófita para sostener la absorción nitrogenada en condiciones de salinidad moderada. En contraste, el Fósforo (P) y el Potasio (K) presentaron una reducción significativa conforme aumentó la conductividad eléctrica (0>4>8 dS/m). La disminución de K (2.6%±0.08 a 2.1%±0.05) sugiere una competencia iónica con el Na+, un fenómeno documentado donde el sodio desplaza al potasio en los sitios de transporte. Los resultados confirman que *S.portulacastrum* posee mecanismos robustos para el crecimiento y nutrición mineral, lo que la hace una candidata idónea para proyectos de fitorremediación y agricultura biosalina en zonas costeras.

INTRODUCCIÓN

La salinización de los suelos agrícolas representa una de las amenazas abióticas y ecológicas más críticas a nivel mundial, afectando severamente a millones de hectáreas y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria. Este fenómeno se agudiza por la escasez de recursos hídricos, impactando de forma perjudicial la productividad de los cultivos, degrada la biodiversidad de los ecosistemas y deteriora la calidad del agua, lo que la convierte en un desafío crítico para la agricultura, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Desde la perspectiva fisiológica, la acumulación edáfica de cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de sodio, calcio, magnesio y potasio altera el desarrollo vegetal al inducir toxicidad iónica y estrés osmótico. En México, este escenario es particularmente alarmante en la región norte del estado de Sinaloa. En los últimos años, la combinación de sequías prolongadas, la baja disponibilidad de agua para riego de calidad y un

manejo agrícola deficiente han acelerado la salinización de sus valles, causando un bajo rendimiento de los cultivos. Ante esto, la búsqueda de estrategias que exploren las respuestas morfológicas, fisiológicas y metabólicas de los cultivos se ha vuelto una prioridad científica indispensable. Frente a los altos costos de los métodos físico-químicos tradicionales, la fitorremediación surge como una tecnología emergente, ecológica, económica y sostenible que aprovecha las capacidades metabólicas, bioquímicas y microbiológicas de ciertas especies vegetales para mitigar la degradación del suelo, mostrando un potencial excepcional en regiones tropicales. Las condiciones climáticas del norte de Sinaloa presentan un escenario ideal para implementar esta biotecnología a través de plantas con alta producción de biomasa. No obstante, la eficiencia de los procesos de fitoextracción y fitoestabilización depende estrictamente de factores como la arquitectura radicular, la tasa de crecimiento, la evapotranspiración de la planta y, fundamentalmente, su capacidad para tolerar cargas osmóticas severas y absorber excesos de sales del sustrato. *Sesuvium portulacastrum* (L.), una especie halófita extrema adaptada a entornos litorales y dunas que posee la capacidad de sobrevivir a concentraciones de NaCl superiores a 1000 mM sin manifestar inhibiciones drásticas en su desarrollo. Además de su valor ecológico en el control de la erosión y el aporte de materia orgánica a la rizósfera, su notable tolerancia al estrés ambiental, sequía y deficiencias nutricionales la convierte en un recurso biotecnológico idóneo para los procesos de fitoextracción y restauración de zonas degradadas por salinidad. El éxito de cualquier estrategia de propagación y fitorremediación en condiciones controladas está condicionado por las propiedades físicas y químicas del sustrato, el cual funciona como soporte mecánico, reservorio de oxígeno y vehículo de nutrición para el sistema radicular. Mientras que sustratos compactados generan hipoxia e inhiben la respiración celular, un medio poroso y con alta Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) asegura una liberación balanceada de macronutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo, potasio y calcio. Bajo regímenes de estrés salino, el uso de minerales aluminosilicatados como la zeolita se presenta como una alternativa innovadora de manejo fitotécnico. Debido a su estructura cristalina porosa y elevada CIC, la zeolita posee la propiedad de retener y dosificar selectivamente cationes antagonistas cruciales (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), actuando como un amortiguador iónico que mitiga la absorción y consecuente toxicidad por sodio (Na^+) en la planta. A pesar del potencial documentado de *S. portulacastrum*, es necesario evaluar rigurosamente cómo interactúa su fisiología halófita con sustratos de base mineral bajo gradientes controlados de conductividad eléctrica. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el perfil de absorción nutrimental foliar y los parámetros de crecimiento morfológico (altura, diámetro del tallo, producción de hojas y brotes) de *Sesuvium portulacastrum* cultivada en sustrato de zeolita y sometida a tres niveles de estrés salino (0, 4 y 8 dS/m). Con ello se busca generar bases técnicas sólidas que validen el uso de este modelo simbiótico (planta-sustrato) en futuros programas de restauración ecológica y recuperación de suelos agrícolas degradados en el noroeste de México.

TEORÍA

Salinidad de Suelos

La salinización de los suelos representa una de las amenazas más críticas, en la producción agrícola, particularmente en zonas áridas y semiáridas, por falta de agua en la agricultura. Uno de los estreses abióticos más severos, amenazando la seguridad alimentaria, siendo de gran relevancia por la afectación a millones de hectáreas de tierras agrícolas a nivel mundial. Este fenómeno tiene efectos perjudiciales sobre la productividad agrícola, la biodiversidad de los ecosistemas y la calidad del agua, lo que convierte en un desafío crítico para la agricultura, especialmente en áreas áridas y semiáridas. La salinidad puede ser provocada tanto por procesos naturales como de actividades humanas, tales como el riego inadecuado, el uso excesivo de fertilizantes y la acumulación de sales solubles derivadas de la evaporación. La salinidad en el suelo, se refiere a la acumulación de sales solubles, que afectan el crecimiento de las plantas. Las sales comunes en suelos salinos incluyen cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos de sodio, calcio, magnesio y potasio. La concentración de estas sales es un factor determinante para el impacto que tiene sobre las plantas, ya que las altas concentraciones elevadas pueden inducir toxicidad iónica y estrés osmótico. (Ahmadi *et al*., 2022)

En México, específicamente en el norte de Sinaloa, los suelos agrícolas enfrentan un problema significativo con la salinidad, en los últimos años, el exceso de sales en estos suelos y falta de agua para los riegos agrícolas, ha causado un bajo rendimiento de los cultivos. Esta situación es común en zonas áridas, donde el mal manejo del agua, el uso inadecuado de fertilizantes y factores como el cambio climático han contribuido a la salinización; en el suelo se puede encontrar diferentes concentraciones de sales con efecto toxico, que dan origen al daño principal de las plantas ocasionado por cloruro de sodio (NaCl), sin embargo, los suelos salinos a menudo presentan diferentes combinaciones complejas de sales, como los cloruros y los sulfatos de Na +, Ca2+, Mg2+ (Lamz y González, 2013). Algunos estudios indican que las plantas tienen mecanismos que les permiten modificar su comportamiento morfológico, fisiológico y molecular en respuesta a los cambios en salinidad y temperatura (Peng et al 2022).

Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología emergente que aprovecha los procesos fisiológicos, bioquímicos y microbiológicos de las plantas para reducir, estabilizar o eliminar contaminantes en suelos, aguas y sedimentos. Hoy en día es de gran interés la aplicación de fitorremediación, por ser una alternativa ecológica, económica y sostenible frente a los métodos físico-químicos tradicionales, mostrando un potencial excepcional en las regiones tropicales como el norte de Sinaloa. En estas zonas, factores climáticos como las temperaturas constantes, la alta radiación solar y las lluvias estacionales, sumados a una vasta diversidad florística nativa, propician un escenario ideal para el desarrollo de especies vegetales con una alta producción de biomasa, cualidad que maximiza la capacidad de extracción, transformación o estabilización de sustancias tóxicas. No obstante, el éxito de su aplicación en campo exige una rigurosa selección de plantas basadas en criterios clave como su tasa de crecimiento, la arquitectura y profundidad de su sistema radicular, su tolerancia a contaminantes específicos, su tasa de evapotranspiración y su capacidad para establecer interacciones benéficas con microorganismos del suelo. La eficiencia de este proceso está directamente condicionada por la naturaleza y concentración del contaminante, su biodisponibilidad y las propiedades fisicoquímicas del sustrato, tales como el pH, la textura y el contenido de materia orgánica. Se han reportado casos de plantas fitorremediadoras que, además de tolerar entornos contaminados, actúan como filtros, capaces de absorber de una manera eficiente el exceso de sales, nutrientes y metales pesados del sustrato Slama *et al*., 2011.

Existe un creciente interés científico en las capacidades de ciertas plantas fitorremediadoras que, además de tolerar entornos hostiles, actúan como filtros biológicos activos capaces de absorber de manera eficiente el exceso de sales, nutrientes y metales pesados del sustrato. La tasa de extracción de estos elementos está estrechamente ligada a la calidad del agua de riego y a la carga osmótica del medio. Un claro ejemplo de esta dinámica metabólica se observa en la remoción de macronutrientes esenciales que suelen formar sales en el suelo: se ha demostrado que estas especies pueden captar entre el 3% y el 47% del nitrógeno disponible, y desde un 3% hasta un notable 60% del fósforo presente. Esto consolida a este tipo de vegetación como una herramienta biotecnológica clave no solo para la descontaminación, sino para la recuperación de la fertilidad y el equilibrio osmótico en suelos agrícolas degradados (Peng et al., 2022). Un ejemplo son las plantas de *sesuvium portulacastrum*, la cual ha manifestado una alta tolerancia a la salinidad, posicionándose como una excelente opción para la restauración de estas zonas (Slama et al., 2007).

Sesuvium portulacastrum

S. portulacastrum pertenece al grupo de las halófilas, que se caracterizan por crecer en entornos de alta salinidad y tienen la capacidad de reducirla, presenta una alta tolerancia al estrés ambiental, salinidad, sequía y a las deficiencias nutricionales, siendo una planta viable para los procesos de fito-extracción y fito-estabilización de los suelos (Jaja et al., 2023). exhibe una notable tolerancia a la salinidad, siendo capaz de sobrevivir en concentraciones de NaCl superiores a 1000 mM sin mostrar una inhibición significativa de su crecimiento, lo que la clasifica como una halófita extrema (Slama et al., 2007). En el ámbito ecológico, *S. portulacastrum* desempeña un papel fundamental en la estabilización de dunas y suelos litorales, contribuyendo activamente al control de la erosión eólica e hídrica. Asimismo, incrementa la fertilidad edáfica mediante el aporte continuo de materia orgánica y la estimulación de comunidades microbianas benéficas en su rizosfera. Debido a este

conjunto de propiedades biogeoquímicas, esta especie es considerada un recurso biotecnológico de alto valor para el diseño e implementación de programas de restauración ecológica en zonas degradadas por salinización, derrames de hidrocarburos u otras formas de contaminación antropogénica (Jonh et al 2024).

Importancia del sustrato en el crecimiento de las plantas

El sustrato constituye uno de los componentes fundamentales para el desarrollo óptimo de las plantas, ya que representa el medio físico en el cual se establece el sistema radicular y el vehículo a través del cual se suministran el agua, el oxígeno y los nutrientes esenciales para el crecimiento Tanto en los sistemas agrícolas tradicionales como en la agricultura sustentada en cultivos sin suelo, el tipo, la calidad y las propiedades inherentes del sustrato inciden de forma directa en la fisiología vegetal, la eficiencia en el uso de los recursos y la productividad final del cultivo, desde la perspectiva física, un sustrato de alta calidad debe ofrecer una arquitectura estructural balanceada que combine una adecuada aireación y un drenaje eficiente con una capacidad de retención de agua suficiente para satisfacer las demandas hídricas de la planta. En este sentido, la porosidad total, la densidad aparente y la estabilidad estructural son las propiedades físicas determinantes en la disponibilidad de oxígeno y agua dentro de la rizosfera. Un sustrato compactado o con un déficit de porosidad macroscópica tiende a generar condiciones hipóxicas, las cuales inhiben la respiración radicular y restringen la absorción activa de nutrientes, el sustrato funciona como un reservorio dinámico de macronutrientes esenciales tales como nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, donde la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) regula la retención y liberación paulatina de estos elementos hacia la solución del suelo (Montoya-Jasso, et al., 2021).

PARTE EXPERIMENTAL

Sitio de estudio y obtención del material vegetal

El presente estudio se llevó a cabo en los laboratorios del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN). El material biológico base se obtuvo a partir de especímenes silvestres de verdolaga de playa (*Sesuvium portulacastrum* L.) recolectados en la zona costera del municipio de Guasave, Sinaloa, México (25°17'12.1" N, 108°30'00.1" W). Las plantas recolectadas se sometieron a un periodo de aclimatación en condiciones controladas de invernadero. Posteriormente, se seleccionaron y estandarizaron 15 esquejes apicales con una longitud homogénea de 20 cm procedentes de las plantas madre. Para garantizar la sanidad del ensayo, los esquejes se desinfectaron superficialmente y se colocaron en un sistema de hidroponía basal con agua corriente durante 15 días, a temperatura ambiente 28-32 °C.

Diseño experimental y manejo de tratamientos

Una vez establecido el sistema radicular, las plántulas se trasplantaron de manera individual a unidades experimentales consistentes en macetas de 1 L. con sustrato zeolita. Los tratamientos de estrés salino se estructuraron con base en tres niveles de conductividad eléctrica (CE): 0, 4 y 8 dS/m. Las soluciones salinas se prepararon mediante la dilución de una mezcla de sales marinas comerciales enriquecidas (Red Sea Salt®, Houston, TX, USA) en agua destilada hasta alcanzar las conductividades objetivo, las cuales fueron verificadas mediante un Medidor pH/CE/TDS Hanna Hi9813. El régimen de irrigación consistió en la aplicación de un volumen de 200 mL de la solución salina correspondiente por unidad experimental, con una frecuencia de cada tres días para mantener la saturación constante del sustrato y evitar la concentración de solutos por evaporación.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial. El modelo integró cinco réplicas por tratamiento, definiendo a una planta individual como la unidad experimental independiente, para un total de 15 unidades de observación.

Perfil de análisis de nutrientes foliares

El perfil nutricional en el tejido vegetal se determinó siguiendo los protocolos estandarizados del Manual de análisis químico de tejido vegetal de Alcántar y Sandoval (1999). Inicialmente, el material biológico previamente deshidratado se pulverizó de manera homogénea empleando un molino

eléctrico de cuchillas (Thomas®). Para la liberación de los elementos, el tejido procesado se sometió a una digestión por vía húmeda utilizando una mezcla ternaria de ácidos nítrico, sulfúrico y perclórico.

La cuantificación analítica se diversificó según las propiedades de cada elemento. El contenido de Nitrógeno (N) total se estimó de forma independiente mediante el método Kjeldahl, el cual comprendió las etapas consecutivas de digestión con ácido sulfúrico-salicílico, destilación y titulación. Por su parte, el Fósforo (P) se determinó por colorimetría mediante el complejo vanadato-molibdato amarillo, empleando un espectrofotómetro UV-Visible (Genesis®). La concentración de Potasio (K) se obtuvo por emisión de flama (Thermo Scientific®), mientras que las bases y micronutrientes restantes Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica (Varian®, modelo 50B).

RESULTADOS

El análisis nutricional en las plantas cultivadas en Zeolita demostró un comportamiento caracterizado por la estabilidad estructural y una notable capacidad de regulación iónica frente al incremento de la conductividad eléctrica (CE) de 0, 4 y 8 dS/m

El uso de Zeolita resultó en un patrón de crecimiento intermedio y estable, caracterizado por incrementos graduales y una baja incidencia de reducciones notables ante el aumento de la salinidad. Este comportamiento se atribuye a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de la Zeolita, la cual actúa como un regulador iónico, amortiguando la toxicidad por Na^+ y optimizando la disponibilidad de cationes antagonistas cruciales como K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}.

Nutriente	0 dS/m	4 dS/m	8 dS/m
N (%)	3.24 ± 0.04^{ab}	3.35 ± 0.14^{a}	3.09 ± 0.06^{abc}
P (%)	0.25 ± 0.01^{bcd}	0.23 ± 0.02^{cd}	0.22 ± 0.02^{d}
K (%)	2.6 ± 0.08^{a}	2.27 ± 0.21^{ab}	2.13 ± 0.05^{b}
Ca (%)	1.5 ± 0.07^{a}	1.45 ± 0.04^{a}	1.49 ± 0.04^{a}
Mg (%)	0.61 ± 0.05^{a}	0.61 ± 0.01^{a}	0.56 ± 0.01^{a}
Fe (ppm)	46 ± 4.32^{bc}	40.33 ± 0.47^{c}	42.33 ± 0.94^{c}
Zn (ppm)	43.67 ± 1.25^{a}	32 ± 3.56^{a}	35.33 ± 0.47^{a}
Mn (ppm)	33.33 ± 1.89^{ab}	32 ± 2.16^{ab}	28.67 ± 2.87^{b}
Cu (ppm)	34.67 ± 0.47^{a}	31 ± 0.82^{ab}	33 ± 2.45^{a}

Tabla 1. Absorción nutrimental de *Sesuvium portulacastrum* a los 60 días bajo distintas salinidades en sustrato Zeolita.



Figura 2. *Sesuvium portulacastrum* a los 60 días en sustrato Zeolita

El sustrato de zeolita influyó de manera diferenciada en la absorción y acumulación de macronutrientes y micronutrientes en el tejido foliar:

Nitrógeno (N): Los contenidos de N se mantuvieron en niveles óptimos y estables. El valor más alto se registró bajo una salinidad intermedia de 4 dS/m (3.35±0.14%), superando levemente a los tratamientos de 0 dS/m (3.24±0.04%) y 8 dS/m (3.09±0.06%), lo que demuestra una asimilación eficiente del nitrógeno incluso bajo condiciones de estrés salino.

Fósforo (P): Se observó una correlación negativa entre la salinidad y la absorción de este elemento. El contenido de P disminuyó gradualmente desde 0.25±0.01en (0 dS/m) hasta su punto más bajo de 0.22±0.02 en la máxima concentración salina (8 dS/m).

Potasio (K): La zeolita destacó significativamente por encima de los demás sustratos evaluados en esta variable. Se obtuvieron concentraciones elevadas de K que oscilaron entre 2.6±0.08 % (0 dS/m),

2.27±0.21 % (4 dS/m) y 2.13±0.05 % (8 dS/m). Este comportamiento se asocia directamente con la estructura cristalina de la zeolita, la cual libera K^+ de forma sostenida.

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg): Ambas variables mostraron una alta estabilidad y no presentaron diferencias significativas inducidas por el incremento de la salinidad. El Ca se mantuvo constante en torno al 1.45 % -1.50 %, mientras que el Mg se estabilizó entre 0.56 % y 0.61 %.

Micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu):

El Hierro (40.33 a 46.00 ppm) y el Zinc (32.00 a 43.67 ppm) no mostraron afectaciones críticas por la salinidad.

El Manganeso exhibió una ligera reducción en el tratamiento de mayor estrés (8 dS/m), descendiendo a 28.67 ± 2.87 ppm.

El Cobre reportó los valores más altos en comparación con otros sustratos de la investigación, alcanzando hasta 34.67 ± 0.47 ppm en 0 dS/m y manteniéndose elevado en 8 dS/m con 33.00 ± 2.45 ppm, debido a la capacidad del sustrato para retener y liberar gradualmente el ion Cu^{2+}.

El análisis del desarrollo morfológico en las plantas de *Sesuvium portulacastrum* cultivadas, con una conductividad eléctrica (CE) de 0, 4 y 8 dS/m en Zeolita, demostró un comportamiento de crecimiento intermedio y estable, caracterizado por incrementos graduales y una baja incidencia de reducciones notables ante el aumento de la salinidad. Obsérvese en la figura 3.

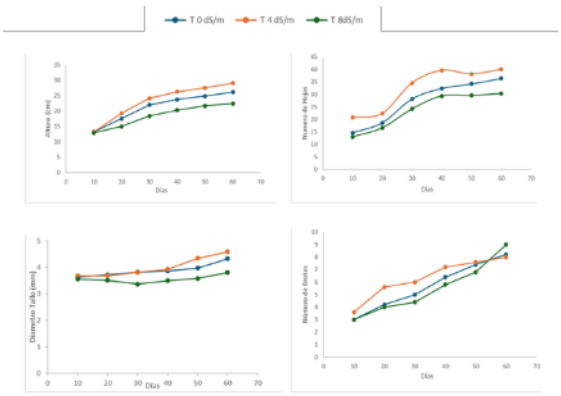


Figura 3. Parametros fisiológicos de *Sesuvium portulacastrum* a los 60 días bajo distintas salinidades en sustrato Zeolit

Altura de la Planta

Las plantas cultivadas en zeolita exhibieron un crecimiento intermedio y altamente estable a lo largo del periodo experimental (0 a 35 días). Zeolita propició incrementos graduales en la longitud de la planta sin manifestar reducciones notables o afectaciones agudas a medida que aumentaba la conductividad eléctrica. Este comportamiento es atribuible a su elevada Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), la cual actúa como un amortiguador iónico que regula la disponibilidad de K^+, Ca^{2+} y Mg^{2+}, mitigando la entrada en toxicidad por Na^+ y proveyendo un balance entre la retención iónica y un crecimiento moderado en fases de adaptación.

Diámetro del Tallo

El diámetro radial del tallo demostró ser una variable con baja sensibilidad al estrés osmótico, manteniéndose notablemente constante entre 3.5 y 4.5 cm en todos los niveles de salinidad. Los tratamientos en zeolita se caracterizaron por una baja variabilidad (reflejada en errores estándar pequeños), indicando que las plantas lograron preservar una estructura vascular funcional y una

adecuada turgencia celular. La alta concentración tisular de potasio (K) y calcio (Ca) provista por el sustrato fue un factor clave para asegurar la integridad de las paredes celulares y el sostén mecánico del tallo

Número de Hojas y Brotes

Hojas: Durante las etapas iniciales de la evaluación, las plantas en zeolita registraron los valores más bajos en la producción foliar en comparación con los demás tratamientos. Esta respuesta se vincula al mecanismo de retención intrínseco de la matriz zeolítica, el cual genera un secuestro temporal de cationes esenciales, retrasando su disponibilidad inmediata para la planta en fases de rápido crecimiento inicial. Sin embargo, la emisión de hojas mantuvo una tasa de incremento progresivo y constante hacia el final del ciclo.

Brotes: En consistencia con el desarrollo foliar, la actividad meristemática lateral mostró una dinámica adaptativa. Destaca de forma particular el tratamiento de Zeolita al 8% de salinidad, el cual evidenció un incremento notorio y acelerado en el número de brotes hacia el cierre del periodo de evaluación (35 días). Este comportamiento tardío confirma que, superada la fase de ajuste inicial, el sustrato optimiza la nutrición a medio plazo, regulando elementos clave para la regeneración y la emisión de brotes laterales.

CONCLUSIONES

El análisis integral de los resultados permite concluir que la zeolita se consolida como un sustrato de alta estabilidad estructural y regulatoria para el cultivo de *S. portulacastrum* en escenarios de salinidad variable. Su comportamiento fisiológico y nutrimental destaca por los siguientes aspectos clave: su capacidad de intercambio catiónico. Su estructura cristalina facilitó una liberación sostenida de potasio (K) y optimizó la disponibilidad de cobre (Cu), logrando los niveles tisulares más altos de la investigación para ambos elementos. Este mecanismo amortiguador previno la toxicidad por Na^+ y mantuvo un balance de macronutrientes esenciales (N, Ca, Mg) notablemente estable, incluso ante una conductividad eléctrica elevada de 8 dS/m. A diferencia de otros sustratos propensos a la acumulación crítica de sales, la zeolita garantizó un crecimiento en altura intermedio, constante y sin declives abruptos a lo largo del tiempo. Asimismo, la óptima nutrición de potasio y calcio resguardó la turgencia celular y la integridad vascular de las plantas, lo que se tradujo en un diámetro del tallo altamente homogéneo y resistente al estrés osmótico.

El sustrato zeolita generó un secuestro catiónico inicial que ralentizó la producción foliar en las primeras etapas, el sistema demostró una notable recuperación a mediano plazo. Esto quedó evidenciado en el tratamiento de máxima salinidad (8 dS/m), el cual desencadenó una vigorosa respuesta de brotación lateral hacia los 35 días, confirmando que el sustrato mejora la disponibilidad nutrimental de manera progresiva a medida que la planta se adapta.

AGRADECIMIENTOS: Instituto Politécnico Nacional, Secretaria de Investigación y Posgrado
Proyectos: SIP20241883, SIP20250827 Y SIP20260696. Esta publicación en un producto académico directo de los resultados del proyecto SIP20250827.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alcántar G. G. y M. Sandoval V. (1999) Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación. Publicación Especial No. 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, México. 156 p.
2. Allen, E. R., & Ming, D. W. (1995). Recent progress in the use of natural zeolites in agronomy and horticulture. In D. W. Ming & F. A. Mumpton (Eds.), Natural Zeolites '93: Occurrence, Properties, Use (pp. 477–490). International Committee on Natural Zeolites.
3. Ahmadi, F., Mohammadkhani, N., & Servati, M. (2022). Halophytes play important role in phytoremediation of salt-affected soils in the bed of Urmia Lake, Iran. *Scientific Reports*, *12*(1), 12223.

4. Jaja, N., Codling, E. E., Timlin, D., Rutto, L. K., & Reddy, V. R. (2023). Phytoremediation efficacy of native vegetation for nutrients and heavy metals on soils amended with poultry litter and fertilizer. *International Journal of Phytoremediation*, *25*(11), 1423–1434.
5. John, J. E., Thangavel, P., Maheswari, M., Balasubramanian, G., Kalaiselvi, T., Kokiladevi, E., y Ramesh, A. (2024). Sesuvium portulacastrum mitigates salinity induced by irrigation with paper and pulp mill effluent. *International Journal of Environmental Studies*, *81*(3), 1420-1432.
6. Lamz-Piedra, A., y González-Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. Cultivos Tropicales, 34(4), 31-42.
7. Montoya-Jasso, V. M., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ruiz-Bello, A., & Arreola-Tostado, J. M. (2021). Caracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana, 39*, e601.
8. Peng, G., Lan, W., & Pan, K. (2022). Mechanisms of metal tolerance in halophytes: A mini review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, *109*(5), 671–683.
9. Slama, I., Ghnaya, T., Messedi, D., Hessini, K., Labidi, N., Savoure, A., Abdelly, C., 2007. Effect of sodium chloride on the response of the halophyte species Sesuvium portulacastrum grown in mannitol-induced water stress. Journal of Plant Research. 120: 291-299.
10. Slama, I., Tayachi, S., Jdey, A., Roueched, A., Abdelly, C., 2011. Differential response to water deficit stress in alfalfa (Medicago sativa) cultivars growth, water relation, osmolyte accumulation and lipid peroxydation. African Journal of Biotechnology. 10: 16250–16259.

EXTRACCIÓN DE PIGMENTOS DE BRÁCTEAS DE BUGAMBILIA FUCSIA (*Bouganvillia Glabra*) PARA SU APLICACIÓN COMO COLORANTE EN ALIMENTOS SOSTENIBLES

Ana Cristina Díaz Díaz[1], Axel André López Joaquín[1], Consuelo de Jesús Cortés Penagos[1], Liliana Márquez Benavides[2], Berenice Yahuaca Juárez[1]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología, UMSNH, [2]Instituto de Investigaciones Agrícolas y Forestales, UMSNH.

berenice.yahuaca@umich.mx

RESUMEN

En las últimas décadas, la industria alimentaria ha tenido que reformular sus productos ajustados a criterios de inocuidad, sostenibilidad y responsabilidad ambiental. Por lo que actualmente, la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles ha intensificado el uso de fuentes naturales de colorantes que reduzcan la dependencia de compuestos sintéticos, debido al impacto ambiental y la percepción negativa por parte del consumidor. En este sentido, las brácteas de bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*), comúnmente apreciadas por su valor ornamental, representan un recurso vegetal con potencial tecnológico para su posible aplicación como colorante natural en alimentos. Este estudio propone la revalorización de una especie ornamental ampliamente distribuida como fuente de compuestos de interés tecnológico, integrando criterios de sostenibilidad, innovación y aprovechamiento racional de recursos vegetales. El presente trabajo tuvo como objetivo la extracción de pigmentos a partir de brácteas de bugambilia fucsia mediante extracción por maceración. El material de estudio consistió en brácteas de bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*) recolectadas en la Cd. de Morelia, Michoacán. Las brácteas se seleccionaron y sanitizaron, posteriormente fueron deshidratadas y pulverizadas. La extracción del pigmento fue por maceración (Compeán-Vargas y col., 2024). Se colocó 1 g de brácteas en 40 mL de etanol al 60% (v/v), durante 24 h a temperatura ambiente en ausencia de luz. En paralelo, se empleó 1 g de brácteas y 40 mL de solución etanólica, sometidos a control de temperatura en baño de agua. Se evaluó el efecto de la temperatura y la concentración de etanol. Las extracciones se realizaron por triplicado. La variable de respuesta fue la absorbancia a 540 nm, cuantificada mediante espectrofotometría tras una dilución 1:10. Los resultados mostraron que la temperatura incrementa de manera significativa la extracción en comparación con la maceración convencional, lo que permite reducir el tiempo de proceso y mejorar la recuperación de pigmento. Las condiciones de extracción influyen en la intensidad cromática obtenida. Desde la perspectiva ambiental, el empleo de etanol como solvente, considerado de menor toxicidad y mayor compatibilidad con aplicaciones alimentarias puede contribuir a desarrollar alternativas más limpias y eficientes. Los pigmentos obtenidos presentan potencial como colorantes naturales en matrices alimentarias.

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos va migrando hacia modelos de producción más sostenibles, de bajo impacto ambiental, y en respuesta a la demanda de productos más naturales por parte del consumidor. En este contexto, los colorantes sintéticos han sido objeto de cuestionamiento debido a posibles efectos adversos y a su origen no renovable, favoreciendo la búsqueda de alternativas naturales obtenidas a partir de matrices vegetales (Delgado-Vargas et al., 2000; Sigurdson et al., 2017). El color representa uno de los atributos sensoriales más importantes en los alimentos, ya que influye directamente en la aceptación y percepción de la calidad por parte del consumidor. Debido a ello, la industria alimentaria ha empleado colorantes para mejorar la apariencia y estabilidad visual de los productos; sin embargo, actualmente existe una tendencia creciente hacia el uso de pigmentos naturales con propiedades funcionales y tecnológicas (Barzola et al., 2023). Esta tendencia se vincula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), que promueve el uso eficiente de recursos y la reducción de sustancias químicas potencialmente riesgosas, así como con el ODS 3 (Salud y bienestar), al

incentivar el desarrollo de alimentos más seguros. De manera complementaria, el aprovechamiento de recursos vegetales subutilizados se alinea con el ODS 13 (Acción por el clima), al favorecer esquemas productivos con menor impacto ambiental.

Los pigmentos vegetales son una clase diversa de compuestos bioactivos responsables de la coloración en plantas, cuya función está asociada con la absorción selectiva de radiación electromagnética y con mecanismos de protección frente al estrés oxidativo (Castañeda-Ovando et al., 2009). Entre estos compuestos destacan las antocianinas, carotenoides y betalaínas, los cuales, además de aportar color, presentan propiedades antioxidantes que pueden contribuir a la estabilidad de los alimentos y al beneficio nutricional.

La bugambilia (*Bougainvillea sp*.) pertenece a la familia Nyctaginaceae y comprende aproximadamente 18 especies distribuidas ampliamente en regiones tropicales y subtropicales (Compeán-Vargas et al., 2024). La planta presenta flores pequeñas rodeadas de brácteas de colores intensos que pueden variar entre rosa, rojo, violeta, púrpura, amarillo, beige y blanco (Compeán-Vargas et al., 2024). En particular, las brácteas de bugambilia (*Bougainvillea glabra*) presentan una notable diversidad cromática que abarca tonalidades fucsia, púrpura, rojo intenso, naranja, blanco y amarillo, dependiendo de la variedad, condiciones ambientales y composición fitoquímica. Esta variabilidad está asociada principalmente a la presencia y concentración de betalaínas, especialmente betacianinas y betaxantinas, así como a la posible interacción con otros compuestos fenólicos. Las tonalidades más intensas, como el fucsia característico, están relacionadas con una alta concentración de betacianinas, incrementando su interés como fuente de colorantes naturales con alta intensidad cromática (Wu et al., 2022).

Las betalaínas son pigmentos hidrofílicos nitrogenados derivados de la tirosina, los cuales se clasifican en betacianinas y betaxantinas (Azeredo, 2009; Compeán-Vargas et al., 2024). Las betacianinas son responsables de tonalidades rojo-violeta y fucsia, mientras que las betaxantinas generan colores amarillo-naranja. Además de aportar color, estos compuestos presentan propiedades antioxidantes relevantes, lo que incrementa su interés para aplicaciones alimentarias y funcionales (Abarca-Vargas y Petricevich, 2018). Asimismo, diversos estudios han reportado que las brácteas de bugambilia contienen compuestos fenólicos y flavonoides con capacidad antioxidante, (Compeán-Vargas et al., 2024).

Entre los métodos convencionales para la extracción de estos pigmentos destaca la maceración, un método que depende de variables como el tipo y concentración del solvente, el tiempo de contacto, la temperatura y la relación sólido-líquido. El uso de soluciones hidroalcohólicas, como etanol-agua, es útil para la extracción de compuestos fenólicos y pigmentos debido a su polaridad intermedia y su compatibilidad con aplicaciones alimentarias (Compeán-Vargas et al., 2024). La temperatura, por su parte, influye significativamente en la cinética de extracción, ya que favorece la difusión de los compuestos y la disrupción de estructuras celulares, facilitando la liberación de pigmentos intracelulares. No obstante, debido a la naturaleza termosensible de las betalaínas, es necesario establecer condiciones controladas que eviten su degradación y permitan conservar su intensidad cromática (Azeredo, 2009).

Las brácteas de bugambilia son una matriz vegetal que puede contribuir al desarrollo de colorantes naturales sostenibles. Por lo que, el estudio de las condiciones de extracción que optimicen la obtención de estos pigmentos es importante para su incorporación en matrices alimentarias y su eventual aplicación a nivel industrial.

TEORÍA

Las brácteas de *Bougainvillea glabra* constituyen una fuente vegetal de pigmentos con interés tecnológico, principalmente las betalaínas, un grupo de compuestos nitrogenados hidrosolubles derivados del ácido betalámico. Estas moléculas se clasifican en betacianinas, responsables de tonalidades rojo, púrpura y fucsia, y betaxantinas, asociadas a colores amarillos y anaranjados (Castañeda-Ovando et al., 2009; Azeredo, 2009). La diversidad cromática observada en las brácteas

de bugambilia (Fucsia, púrpura, rojo, naranja, amarillo y blanco) está relacionada con la proporción de estos pigmentos, particularmente con el predominio de betacianinas en tonalidades intensas como el fucsia, mientras que las betaxantinas forman parte de las tonalidades más claras o amarillas (Wu et al., 2022).

Además de su función cromática, las betalainas poseen propiedades antioxidantes que incrementan su valor funcional y tecnológico. Se ha demostrado que las diferencias de color observadas en las brácteas de Bougainvillea están asociadas con variaciones en el contenido y proporción de betacianinas y betaxantinas. En general, las brácteas con tonalidades más intensas presentan mayores concentraciones de estos pigmentos, lo que se relaciona con una mayor capacidad antioxidante de los extractos obtenidos (Wu et al., 2022). De igual manera, Martínez et al. (2024) señalan que las diferencias en la composición de pigmentos influyen directamente en la estabilidad y capacidad antioxidante de los extractos obtenidos. Así mismo, diversos estudios han documentado la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides en las brácteas de bugambilia. Lo anterior, puede ser aprovechado aplicaciones alimentarias y funcionales (Abarca-Vargas y Petricevich, 2018).

Las betalaínas han sido consideradas compuestos de baja toxicidad y de interés para aplicaciones alimentarias debido a su origen natural y a sus propiedades antioxidantes (Azeredo, 2009). De manera similar a otras matrices vegetales ricas en betalaínas, como Beta vulgaris, estos pigmentos han mostrado ausencia de efectos tóxicos relevantes en concentraciones utilizadas en alimentos y aplicaciones farmacológicas (Martínez et al., 2024). Abarca-Vargas y Petricevich (2018) reportaron además que diferentes especies del género Bougainvillea han sido utilizadas tradicionalmente en preparaciones medicinales y estudios farmacológicos sin evidenciar toxicidad aguda significativa en modelos experimentales.

No obstante, la composición fitoquímica de Bougainvillea glabra no se limita únicamente a betalaínas. Se ha documentado la presencia de metabolitos secundarios como flavonoides, compuestos fenólicos, taninos, alcaloides y saponinas en distintas estructuras de la planta (Abarca-Vargas y Petricevich, 2018). Aunque muchos de estos compuestos poseen propiedades bioactivas benéficas, algunos metabolitos secundarios pueden modificar las propiedades biológicas o sensoriales de los extractos cuando son coextraídos en concentraciones elevadas. Por ello, el tipo de solvente y las condiciones de extracción representan factores críticos para favorecer la selectividad hacia los pigmentos deseados.

Desde el punto de vista fisicoquímico, las betalaínas presentan alta solubilidad en agua y sistemas hidroalcohólicos, lo que favorece su extracción mediante solventes polares. No obstante, su estabilidad es limitada y depende de factores como pH, temperatura, presencia de oxígeno y exposición a la luz (Azeredo, 2009). Se ha demostrado que las betalaínas presentan mayor estabilidad en condiciones ácidas (pH entre 4 y 6), donde conservan con mayor eficiencia su estructura química y su intensidad cromática (Azeredo, 2009; Wu et al., 2022b). Cuando el pH se desplaza hacia condiciones más ácidas (pH < 3) o alcalinas (pH > 7), se incrementan los procesos de degradación y pérdida de color debido a reacciones de hidrólisis y oxidación de los pigmentos. Así mismo, temperaturas superiores a 50–60 °C pueden inducir degradación térmica de las betalaínas, afectando tanto la intensidad cromática como la capacidad antioxidante del compuesto (Azeredo, 2009; Wu et al., 2022b). Por otra parte, estudios realizados en matrices vegetales ricas en betalaínas indican que el almacenamiento a bajas temperaturas (alrededor de 4 °C), permite conservar una mayor concentración de pigmentos en comparación con temperaturas ambientales cercanas a 20–25 °C, donde se acelera la degradación de betacianinas y betaxantinas (Mejía-Vásquez, 2023).

La extracción de pigmentos vegetales corresponde a una operación de transferencia de masa en la que los compuestos de interés migran desde la matriz sólida hacia un solvente líquido. La eficiencia de este proceso depende de factores como el tamaño de partícula, la relación sólido-líquido, el tiempo de contacto, la temperatura y las características fisicoquímicas del solvente, variables que influyen directamente en la difusión y solubilización de los compuestos presentes en los tejidos vegetales (Cacace & Mazza, 2003). Las mezclas hidroalcohólicas como etanol-agua, poseen una

polaridad intermedia, la cual favorece la solubilización tanto de compuestos fenólicos como de pigmentos hidrosolubles, además de su compatibilidad con aplicaciones alimentarias (Compeán-Vargas et al., 2024). El uso de etanol representa además una alternativa relativamente segura en comparación con otros solventes orgánicos más agresivos, disminuyendo el riesgo de residuos tóxicos en extractos destinados a aplicaciones alimentarias.

La maceración es uno de los métodos más utilizados para la extracción de compuestos bioactivos. Durante este proceso, el solvente penetra la matriz vegetal, solubiliza los compuestos y favorece su difusión hacia el medio líquido (Cacace & Mazza, 2003). Es importante durante el proceso, el control de variables como el tiempo y la temperatura de extracción, ya que condiciones extremas pueden favorecer además, la extracción de metabolitos secundarios no deseados distintos a las betalaínas.

La temperatura desempeña un papel determinante en la cinética de extracción. Un incremento térmico favorece la movilidad molecular, disminuye la viscosidad del solvente y facilita la ruptura de estructuras celulares, incrementando la liberación de pigmentos intracelulares (Azeredo, 2009). Sin embargo, debido a la susceptibilidad térmica de las betalaínas, temperaturas elevadas pueden reducir la estabilidad del pigmento y modificar su intensidad cromática (Wu et al., 2022b).

Por otro lado, la concentración del solvente influye directamente en la polaridad del sistema de extracción. El uso de mezclas hidroalcohólicas incrementa significativamente la eficiencia en la recuperación de compuestos bioactivos en comparación con solventes individuales, ya que permite ajustar la polaridad del medio y favorecer la solubilización de moléculas con diferente naturaleza química. Diversos estudios han demostrado que las mezclas hidroalcohólicas presentan una mayor eficiencia para la extracción de compuestos fenólicos y pigmentos en comparación con el uso de agua o etanol puros. Este comportamiento se atribuye a que la combinación agua-etanol genera un sistema con polaridad intermedia capaz de solubilizar compuestos con diferentes características químicas, favoreciendo las interacciones soluto-solvente y mejorando la difusión de metabolitos desde la matriz vegetal hacia el medio extractor (Plaskova & Mlcek, 2023; Alara et al., 2021).

Además de los métodos convencionales, se han desarrollado tecnologías alternativas como extracción asistida por microondas, ultrasonido y sistemas acuosos bifásicos, los cuales permiten mejorar el rendimiento y reducir los tiempos de proceso. En particular, Rodríguez-Herrera et al. (2023) reportaron que la extracción acuosa bifásica fue eficaz para la separación y concentración de betalaínas a partir de brácteas de *Bougainvillea glabra*, evidenciando el potencial de esta especie como fuente de colorantes naturales. Por su parte, Compeán-Vargas et al. (2024) observaron que la extracción por ultrasonido utilizando etanol al 60 % y temperaturas cercanas a 55 °C favoreció la recuperación de pigmentos de bugambilia.

El uso de pigmentos naturales derivados de matrices vegetales se alinea con los principios de la Agenda 2030, particularmente con el ODS 12 enfocado en producción y consumo responsables, así como con el ODS 3 y el ODS 13 relacionados con salud y reducción del impacto ambiental (Naciones Unidas, 2020). En este contexto, el aprovechamiento de especies ornamentales como la bugambilia es una estrategia para el desarrollo de ingredientes funcionales y colorantes naturales en la industria alimentaria. Por lo anteriormente expuesto, la presente investigación tuvo como objetivo general la obtención de pigmentos a partir de brácteas de bugambilia fucsia mediante extracción por maceración.

PARTE EXPERIMENTAL

Material de estudio

Se utilizaron brácteas de Bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*) recolectadas en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. La recolección se realizó seleccionando brácteas en buen estado fisiológico, libres de daño mecánico, contaminación visible o signos de deterioro. El material vegetal fue transportado al laboratorio de Biotecnología “M.C. Víctor M. Rodríguez Alcocer” de la Facultad

de Químico Farmacobiología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el transporte fue en condiciones sanitarias y protegido de la luz para evitar la degradación de los pigmentos.

Preparación de la muestra

Las brácteas fueron seleccionadas manualmente para eliminar impurezas, posteriormente se sanitizaron mediante enjuague con agua potable y desinfección con una solución yodada durante 10 minutos. Al término, las brácteas se enjuagaron con agua destilada para eliminar residuos del desinfectante. El material vegetal se deshidrató por 12 hrs a 50 °C. Una vez deshidratadas, las brácteas fueron pulverizadas hasta obtener un tamaño de partícula homogéneo.

Extracción de pigmentos

La extracción de pigmentos se realizó por maceración. Para ello, se pesó 1 g de muestra pulverizada y se colocó en contacto con 40 mL de solución hidroalcohólica de etanol al 60 % (v/v), estableciendo una relación sólido-líquido de 1:40. El sistema se mantuvo en reposo durante 24 horas a 25 °C y en ausencia de luz, con el fin de evitar la degradación de los pigmentos fotosensibles. Para evaluar el efecto de la temperatura sobre la optimización de extracción, se utilizó la misma relación sólido-líquido y concentración de solvente anterior, las muestras se llevaron a baño maría a temperatura constante (40–50 °C) durante el mismo tiempo de extracción.

Al finalizar el proceso de maceración, los extractos se filtraron con papel filtro (Whatman No. 1) para separar los residuos sólidos. Los extractos obtenidos se almacenaron en recipientes ámbar a 4 °C hasta su análisis.

Determinación espectrofotométrica

La cuantificación relativa de los pigmentos se realizó mediante espectrofotometría UV-Vis. Previo al análisis, los extractos fueron diluidos en una proporción 1:10 con el mismo solvente de extracción, con el objetivo de obtener lecturas dentro del rango lineal del equipo.

Las mediciones se llevaron a cabo a una longitud de onda de 540 nm, correspondiente al máximo de absorción de las betacianinas. Se utilizó como blanco el solvente hidroalcohólico al 60 % (v/v). Las lecturas se realizaron por triplicado para cada tratamiento.

Diseño experimental y análisis

Las extracciones se realizaron por triplicado bajo dos condiciones: maceración a temperatura ambiente y maceración con control térmico. La variable de respuesta fue la absorbancia a 540 nm, utilizada como indicador de la concentración relativa de pigmentos extraídos.

Los resultados obtenidos fueron expresados como promedio ± desviación estándar. La comparación entre tratamientos permitió evaluar el efecto de la temperatura sobre la eficiencia del proceso de extracción.

RESULTADOS

Las condiciones de extracción aplicadas sobre las brácteas de Bugambilia fucsia (*Bougainvillea glabra*) mostraron diferencias en los valores de absorbancia a 540 nm, longitud de onda asociada con la detección de betalainas, particularmente betacianinas responsables de tonalidades rojizas y magenta (Azeredo, 2009). Previo al proceso de extracción, las brácteas deshidratadas a 55 °C durante 16 h y posteriormente pulverizadas obtuvieron un de croma de 21.77, este valor se relaciona con la intensidad de color presente en el material vegetal y puede asociarse con la concentración de pigmentos presentes en las brácteas (Castañeda-Ovando et al., 2009).

En referencia a la extracción de pigmentos, en la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de la extracción por maceración utilizando etanol al 60 % (v/v) durante siete días a 4 °C y en ausencia de luz.

Tabla 1. Absorbancia obtenida mediante extracción por maceración de pigmentos de bugambilia fucsia.

Método	Condiciones de extracción	Absorbancia (540 nm)
Maceración	Etanol 60 %, 4 °C, 7 días	0.243
Maceración	Etanol 60 %, 4 °C, 7 días	0.452

Los valores de absorbancia obtenidos mediante maceración fueron menores respecto a los registrados en extracción asistida, presentando valores de 0.243 y 0.452 a 540 nm. En contraste, los tratamientos realizados mediante extracción asistida a 30 °C y 45 °C presentaron valores de absorbancia entre 3.452 y 3.633. Este comportamiento sugiere una mayor recuperación de pigmentos bajo condiciones de calentamiento moderado. Diversos estudios han señalado que las betalainas presentan sensibilidad frente a factores ambientales como temperatura, oxígeno y radiación luminosa, condiciones que influyen directamente sobre su estabilidad e intensidad cromática (Azeredo, 2009). Así mismo, las soluciones hidroalcohólicas favorecen la solubilización de compuestos fenólicos y pigmentos debido a la polaridad intermedia del sistema solvente (Compeán-Vargas et al., 2024).

Con la finalidad de evaluar el efecto de la temperatura y concentración de etanol sobre la extracción de pigmentos, se realizó extracción asistida mediante baño María bajo diferentes condiciones experimentales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Absorbancia obtenida mediante extracción asistida de pigmentos de bugambilia fucsia.

Nivel experimental	Condiciones	Absorbancia (540 nm)
Bajo	Etanol 50 %, 30 °C, 15 min	3.591
Bajo	Etanol 50 %, 30 °C, 15 min	3.452
Medio	Etanol 70 %, 45 °C, 30 min	3.633
Medio	Etanol 70 %, 45 °C, 30 min	3.586
Alto	Etanol 90 %, 60 °C, 45 min	0.127
Alto	Etanol 90 %, 60 °C, 45 min	0.451

Los tratamientos correspondientes al nivel bajo y nivel medio presentaron valores de absorbancia entre 3.452 y 3.633, mientras que el tratamiento correspondiente al nivel alto presentó valores entre 0.127 y 0.451. Estos resultados indican diferencias en la recuperación de pigmentos dependiendo de las condiciones de extracción utilizadas. El incremento de temperatura hasta 30 °C y 45 °C, combinado con soluciones de etanol al 50 % y 70 %, se relacionó con mayores valores de absorbancia respecto a la maceración convencional. La temperatura influye directamente en la eficiencia de extracción debido a que incrementa la transferencia de masa y favorece la difusión de los compuestos desde la matriz vegetal hacia el solvente, facilitando su recuperación durante el proceso extractivo (Bhadange et al., 2024). Por ello, condiciones moderadas de calentamiento pueden incrementar la extracción de pigmentos.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de las brácteas de *Bougainvillea glabra* como fuente de pigmentos naturales con posible aplicación en alimentos sostenibles. Estudios recientes han demostrado que el uso de pigmentos derivados de bugambilia puede modificar parámetros cromáticos en matrices alimentarias. Juárez-López et al. (2024) reportaron que la incorporación de bugambilia liofilizada en emulsiones cárnicas incrementó significativamente los valores de color rojo (a*), indicando la capacidad de estos pigmentos para aportar tonalidades rojizas en productos alimentarios.

Las betalaínas presentes en bugambilia corresponden principalmente a betacianinas responsables de tonalidades rojizas y magenta, compuestos similares a los encontrados en remolacha (*Beta vulgaris*) (Azeredo, 2009). Sin embargo, uno de los principales problemas tecnológicos asociados a estos pigmentos es su estabilidad frente a factores ambientales. Diversos estudios han demostrado que las betalainas son sensibles al calor, oxígeno, luz y variaciones extremas de pH, factores que pueden acelerar procesos de oxidación, hidrólisis y pérdida de intensidad cromática (Azeredo, 2009; Wu et al., 2022b).

En el presente estudio, aunque temperaturas de 30 °C y 45 °C favorecieron la extracción de pigmentos, el tratamiento realizado a 60 °C con etanol al 90 % presentó menores valores de absorbancia. Azeredo (2009) reportó que temperaturas superiores a 50–60 °C pueden favorecer degradación parcial de betalainas y afectar la estabilidad cromática de los extractos. Además, las betalainas poseen naturaleza polar, por lo que soluciones hidroalcohólicas intermedias pueden favorecer una mayor recuperación respecto a concentraciones elevadas de etanol (Strack et al., 2003). Los resultados también mostraron menor variación entre repeticiones en el nivel bajo, donde las absorbancias obtenidas fueron 3.591 y 3.452. Este comportamiento sugiere mayor uniformidad experimental bajo condiciones moderadas de temperatura y concentración de solvente.

Es fundamental mencionar que, desde el punto de vista normativo, que un pigmento sea de origen natural no implica automáticamente su autorización para uso alimentario. Los colorantes destinados a alimentos requieren evaluaciones toxicológicas y procesos regulatorios establecidos por organismos sanitarios como COFEPRIS, FDA o EFSA. Aunque diferentes especies de Bougainvillea han mostrado baja toxicidad en estudios experimentales (Abarca-Vargas y Petricevich, 2018), los pigmentos derivados de bugambilia aún no se encuentran ampliamente estandarizados ni autorizados como aditivos alimentarios en numerosos países, por lo que su utilización permanece principalmente en etapas de investigación y desarrollo tecnológico.

Además, la obtención de extractos pigmentarios estables requiere condiciones controladas de extracción, secado y almacenamiento, incluyendo control de temperatura, pH y exposición al oxígeno. Estas variables incrementan la complejidad del proceso respecto a otros colorantes naturales ya establecidos comercialmente, como betalainas de remolacha, curcumina o carotenoides. Otros factores como la variabilidad genética y estacional de la bugambilia pueden generar diferencias en intensidad y composición del color, aspecto relevante para la estandarización industrial de productos alimentarios.

Las diferencias observadas en absorbancia entre los tratamientos evidenciaron que las condiciones de extracción modifican la recuperación de pigmentos presentes en las brácteas de Bougainvillea glabra. Los extractos obtenidos mostraron respuesta espectrofotométrica a 540 nm, asociada con la presencia de betalaínas, particularmente betacianinas responsables de las tonalidades fucsia características de esta especie vegetal. Estos resultados coinciden con lo reportado para matrices vegetales ricas en betalainas, donde la eficiencia de extracción depende de la interacción entre temperatura, tiempo y polaridad del sistema solvente (Azeredo, 2009; Wu et al., 2022b).

CONCLUSIONES

Las brácteas de *Bougainvillea glabra* son una fuente vegetal con potencial para la obtención de pigmentos naturales mediante sistemas de extracción compatibles con aplicaciones alimentarias. Las condiciones de extracción influyeron directamente sobre la recuperación de pigmentos, evidenciando que el uso de temperaturas moderadas y soluciones hidroalcohólicas favorece la obtención de extractos con mayor intensidad cromática. El aprovechamiento de bugambilia como fuente de colorantes naturales constituye una alternativa para el desarrollo de ingredientes más sostenibles y compatibles con la reducción del uso de aditivos sintéticos en alimentos. En este sentido, el estudio se vincula con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al promover el aprovechamiento de recursos vegetales y el uso de solventes de menor impacto; con el ODS 3 (Salud y bienestar), mediante la búsqueda de alternativas naturales para aplicaciones alimentarias; y con el ODS 13 (Acción por el clima), al contribuir a estrategias orientadas hacia sistemas

alimentarios con menor dependencia de compuestos sintéticos y mayor valorización de recursos vegetales subutilizados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca-Vargas, R., & Petricevich, V. L. (2018). Bougainvillea genus: A review on phytochemistry, pharmacology, and toxicology. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2018, 9070927. https://doi.org/10.1155/2018/9070927.
2. Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. Current Research in Food Science, 4, 200–214. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011
3. Azeredo, H. M. C. (2009). Betalains: Properties, sources, applications, and stability – A review. International Journal of Food Science and Technology, 44(12), 2365–2376. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x.
4. Bhadange, Y. A., Chavan, P. G., Rathod, V. K., Patil, P. D., & otros autores. (2024). A comprehensive review on advanced extraction techniques for bioactive compounds. ACS Omega, 9(25), 24457–24486. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02718
5. Barzola S., Rodríguez J. y Casariego A. 2023. Colorantes para uso alimentario a partir de hojas de teca (Tectona Grandis L.). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. 117 pp. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.uteq.edu.ec/server/api/core/bitstreams/da733130-5acd-4364-875f-3fb8de0719fb/content
6. Cacace, J. E., & Mazza, G. (2003). Mass transfer process during extraction of phenolic compounds from milled berries. Journal of Food Engineering, 59(4), 379–389. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00497-1
7. Castañeda-Ovando, A., Pacheco-Hernández, M. L., Páez-Hernández, M. E., Rodríguez, J. A., & Galán-Vidal, C. A. (2009). Chemical studies of anthocyanins: A review. Food Chemistry, 113(4), 859–871. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.001
8. Compeán-Vargas, C., Pichardo-Sánchez, A., Rodríguez-Durán, N. R., Del Ángel-Del Ángel, A., & Rodríguez-Durán, L. V. (2024). Extracción y caracterización de pigmentos de las brácteas bugambilia (Bougainvillea sp.). Mexican Journal of Technology and Engineering, 3(1), 44–53. https://doi.org/10.61767/mjte.003.1.4453
9. Delgado-Vargas, F., Jiménez, A. R., & Paredes-López, O. (2000). Natural pigments: Carotenoids, anthocyanins, and betalains—Characteristics, biosynthesis, processing and stability. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 40(3), 173–289. https://doi.org/10.1080/10408690091189257
10. Juárez-López, N., Rodríguez, J. A., Ibarra, I. S., Sánchez-Ortega, I., & Santos, E. M. (2024). Utilización de Bougainvillea glabra en polvo como colorante en emulsiones cárnicas. Pädi, 12(Número Especial 5), 111–116. https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13899
11. Mejía Vásquez, L. V. (2023). Determinación de la concentración de betalainas y betaxantinas en tunas (Opuntia ficus-indica) de diferentes coloraciones evaluados a dos temperaturas (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/6380/TESIS%20LILIA%20VITALUZ%20MEJ%c3%8dA%20V%c3%81SQUEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
12. Plaskova, A., & Mlcek, J. (2023). New insights of the application of water or ethanol-water plant extract rich in active compounds in food. Frontiers in Nutrition, 10, 1118761. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1118761
13. Sigurdson, G. T., Tang, P., & Giusti, M. M. (2017). Natural colorants: Food colorants from natural sources. Annual Review of Food Science and Technology, 8, 261–280. https://doi.org/10.1146/annurev-food-030216-025923
14. Strack, D., Vogt, T., & Schliemann, W. (2003). Recent advances in betalain research. Phytochemistry, 62(3), 247–269. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00564-2

15. Wu, L. C., Hsu, H. W., Chen, Y. C., Chiu, C. C., Lin, Y. I., & Ho, J. A. A. (2006). Antioxidant and antiproliferative activities of red pitaya. Food Chemistry, 95(2), 319–327. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.002

TECNOLOGÍA ALIMENTARIA CIRCULAR APLICADA A CITRUS RETICULADA: DESARROLLO DE GOMITAS FUNCIONALES CON APROVECHAMIENTO INTEGRAL DEL FRUTO

Iván Rivera Chávez, Mitzi Guadalupe Vega Morales, Valeria Naomi Soriano Juárez, Yarely Villanueva Bautista, Getzemani Guadalupe Hernández Rubi y Luz Irene Gómez Barrera.

Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero.
i_rivera@utcgg.edu.mx

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar una alternativa innovadora en el sector de confitería mediante la elaboración de gomitas a base de jugo natural de mandarina (*Citrus reticulata*) con un relleno agridulce tipo chamoy, aprovechando tanto la pulpa como la cáscara del fruto. En México, la mandarina representa un cultivo de relevancia económica y amplia disponibilidad estacional, además de poseer un perfil nutrimental destacado por su contenido de vitamina C, vitaminas del complejo B, antioxidantes y minerales. Sin embargo, gran parte de la cáscara se desecha como residuo orgánico, mientras que las gomitas comerciales suelen contener altos niveles de azúcar y aditivos artificiales. En este contexto, se propuso el desarrollo de un producto con identidad mexicana, enfocado en jóvenes y adultos que buscan opciones más naturales, con sabores intensos y contrastantes, y con un enfoque de aprovechamiento integral de la materia prima. La metodología incluyó la extracción y filtrado del jugo fresco de mandarina, el cual se mezcló con sacarosa y se incorporó grenetina previamente hidratada como agente gelificante. La mezcla fue sometida a calentamiento controlado sin llegar a ebullición para preservar sus propiedades sensoriales y funcionales, posteriormente vertida en moldes y refrigerada hasta su completa gelificación. De forma paralela, se elaboró el relleno tipo agridulce mediante el aprovechamiento de la cáscara y jugo de mandarina, combinados con chile en polvo previamente hidratado, azúcar, sal y tamarindo, sometiendo la mezcla a cocción hasta alcanzar una consistencia espesa similar al chamoy tradicional. Se realizaron ajustes sensoriales para equilibrar los perfiles dulce, ácido y picante, y se establecieron condiciones adecuadas de almacenamiento y empaque en línea con prácticas de higiene e inocuidad alimentaria. Como resultado, se obtuvo un producto con textura firme y elástica, color y aroma naturales característicos de la mandarina, y un relleno con contraste sensorial equilibrado que aporta una experiencia diferenciada frente a las gomitas convencionales. Cualitativamente, la combinación de sabores generó una percepción agradable y distintiva, destacando el balance entre dulzor, acidez y picor. El uso de la cáscara permitió reducir el desperdicio orgánico y aportar valor agregado al subproducto, fortaleciendo el enfoque sostenible del proyecto. Además, el análisis preliminar de costos mostró viabilidad económica para su posible comercialización en presentaciones individuales. El desarrollo de gomitas de mandarina con relleno agridulce demostró ser técnica y sensorialmente factible, con potencial de aceptación en el mercado juvenil y adulto joven. El proyecto integra innovación, aprovechamiento sostenible de recursos y rescate de sabores tradicionales mexicanos, posicionándose como una alternativa diferenciada y con valor agregado dentro de la industria de confitería.

INTRODUCCIÓN

En el contexto agroalimentario de México, el cultivo y la producción de mandarina (*Citrus reticulata*) revisten una importancia socioeconómica fundamental, desarrollándose de forma activa en 19 estados de la República Mexicana. Actualmente, la superficie nacional destinada a la siembra de este cítrico abarca aproximadamente 21,675 hectáreas, lo que se traduce en un volumen de producción anual cercano a las 300,065 toneladas métricas. Entre las regiones con mayor aporte al mercado nacional destacan los estados de Veracruz, con un volumen superior a las 149 mil toneladas; Puebla, con más de 55 mil toneladas; y Nuevo León, que registra una producción por encima de las 52 mil toneladas. El impacto económico global de esta actividad agrícola se estima en una derrama de $813,495.96 MXN anuales, lo que consolida su relevancia tanto en el bienestar

agrario local como en los indicadores macroeconómicos del sector frutícola. La estacionalidad de mayor abundancia y rendimiento óptimo ocurre en el trimestre de octubre a diciembre, periodo en el cual las frutas adquieren sus mejores atributos de frescura, concentración de azúcares y jugosidad, convirtiéndose en el insumo idóneo para su consumo directo o para su procesamiento en la industria de postres y confituras tradicionales.

El mercado mexicano enfocado en el sector de la confitería mantiene una tendencia de crecimiento sostenido debido al constante interés de los consumidores por alternativas alimentarias novedosas que fusionen sabores representativos de la cultura culinaria nacional, tales como las combinaciones agridulces y picantes. No obstante, la gran mayoría de los productos comerciales disponibles en los canales de distribución masiva exhiben formulaciones con un contenido desproporcionado de azúcares refinados, aditivos de síntesis química y colorantes artificiales. Estos componentes químicos representan un factor de riesgo latente para la salud pública al estar estrechamente vinculados con el desarrollo de padecimientos crónicos como la obesidad, el síndrome metabólico y problemas conductuales en sectores infantiles y juveniles.

Frente a esta realidad, la ingeniería y tecnología de alimentos plantea el aprovechamiento de los residuos agroindustriales como una vía eficaz para la innovación sustentable. En el procesamiento industrial y doméstico de los cítricos, entre el 40 % y el 50 % del peso bruto del fruto corresponde a estructuras no consumidas de forma directa (cáscaras, semillas y membranas), las cuales usualmente se disponen en vertederos sin ningún tipo de tratamiento, incrementando la carga de residuos orgánicos. Las cáscaras de mandarina poseen una alta densidad de componentes de valor biológico, incluyendo fibra dietética, aceites esenciales y flavonoides con marcadas propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Por consiguiente, este proyecto aborda el diseño y formulación de una gomita rellena utilizando la pulpa natural de la mandarina para el cuerpo del dulce y sus cáscaras para la manufactura de un chamoy funcional.

TEORÍA

La mandarina (*Citrus reticulata*) constituye una fuente biológica excepcional de nutrientes y compuestos bioactivos esenciales. Su pulpa está compuesta mayoritariamente por agua (85 % aproximadamente) y una fracción de carbohidratos digeribles como glucosa, fructosa y sacarosa. Aporta una concentración considerable de ácido ascórbico (vitamina C), así como vitaminas pertenecientes al complejo B (tiamina B1, riboflavina B2 y piridoxina B6) y betacarotenos que actúan como precursores de la vitamina A, esenciales para la protección tisular y la respuesta inmunológica. En las membranas e hilos blanquecinos se concentra una cantidad importante de fibra soluble que optimiza la función digestiva. Asimismo, contiene minerales indispensables como potasio, calcio, magnesio, hierro, zinc y fósforo, los cuales participan activamente en el mantenimiento del sistema óseo y el equilibrio osmótico celular.

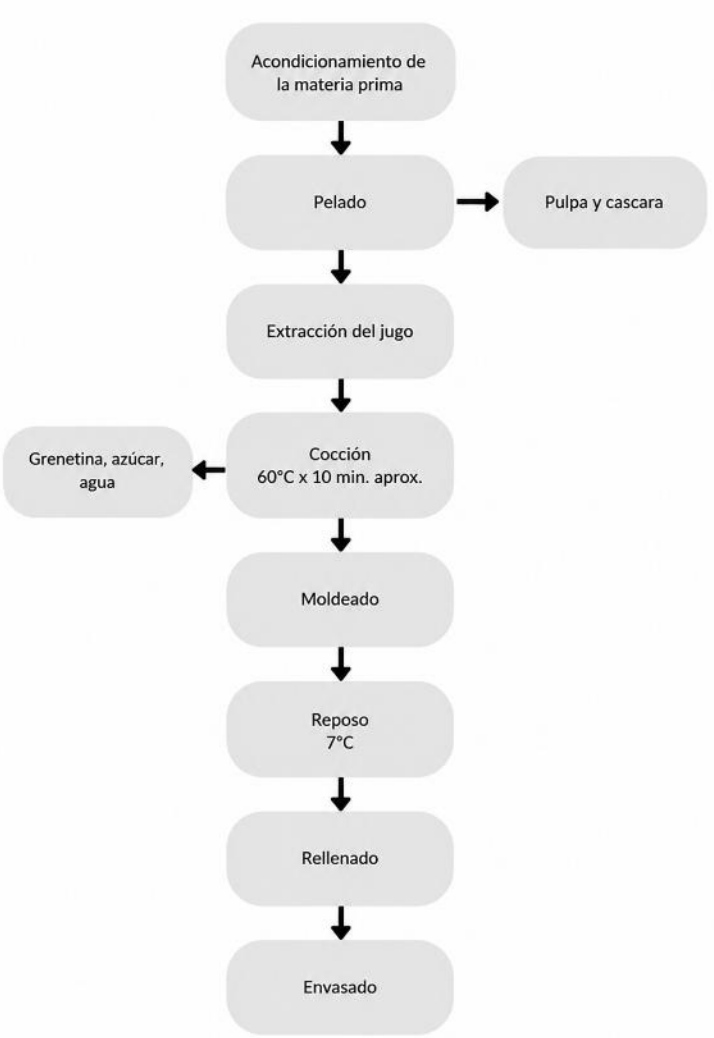
La grenetina ejerce una función tecnológica indispensable en el diseño de matrices de confitería de textura elástica. Como proteína estructural obtenida a partir de la hidrólisis parcial del colágeno, posee la capacidad de desplegarse y formar redes tridimensionales durante el enfriamiento. Esta red retiene el agua libre y los jugos frutales en su interior, proporcionando una textura elástica, controlando la sinéresis y extendiendo la estabilidad física y vida útil del producto terminado sin requerir gomas sintéticas. Por su parte, la cáscara de mandarina contiene compuestos de alto interés industrial como la hesperidina, pectinas de alto metoxilo y aceites esenciales ricos en d-limoneno. Estos fitoquímicos no solo otorgan el perfil aromático característico, sino que aportan una robusta actividad antioxidante y antimicrobiana que coadyuva a la conservación natural del producto, justificando su uso como un ingrediente funcional que sustituye a los conservadores químicos comerciales. La integración de un relleno de chamoy potencia la palatabilidad general al combinar armónicamente notas dulces, ácidas, saladas y picantes muy valoradas por el mercado objetivo, compuesto por jóvenes de 12 a 29 años y adultos de 34 a 60 años que buscan snacks innovadores.

Desde la perspectiva operativa, el procesamiento de este alimento se alinea con las directrices de la sostenibilidad alimentaria y el cumplimiento normativo mexicano. El uso integral del fruto minimiza el

impacto ambiental y reduce los residuos de la cadena de valor. El aseguramiento de la calidad se rige bajo la normatividad oficial vigente: la NOM-051-SCFI/SSA1-2010 para las especificaciones de etiquetado nutrimental y comercial; la NMX-F-131-SCFI-2006 aplicable a jaleas y mermeladas; y la NOM-120-SSA1-1994, que determina las buenas prácticas de higiene que deben seguirse rígidamente durante toda la manufactura del producto en el laboratorio de alimentos para garantizar su total inocuidad.

PARTE EXPERIMENTAL

Figura 1.
Diagrama de flujo del proceso de elaboración de gomitas de mandarina



Proceso tecnológico de la confitura de pulpa de mandarina

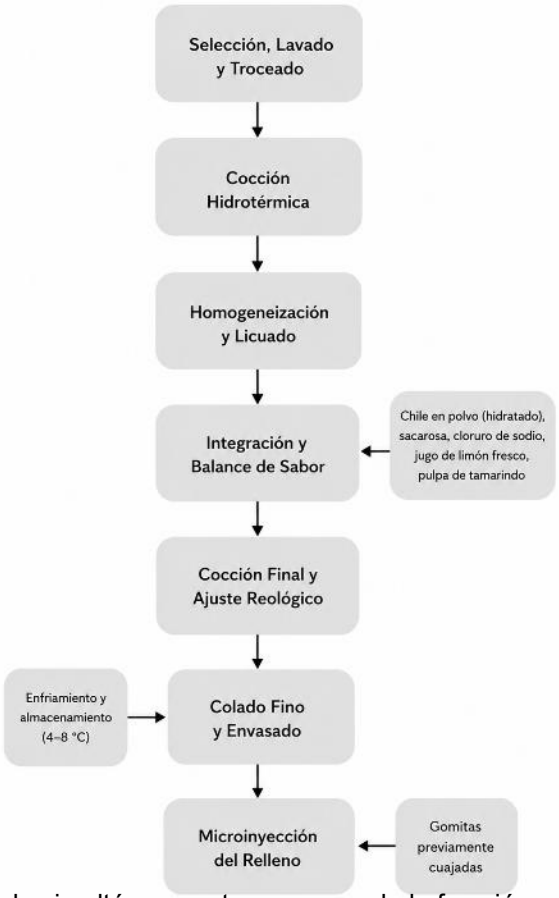
La manufactura de la gomita base se llevó a cabo aplicando una secuencia rigurosa de operaciones unitarias en el laboratorio:

1. Selección y Lavado: Inspección visual de mandarinas frescas y desinfección superficial.

2. Extracción y Tamizado: Exprimido mecánico de la pulpa para la obtención del jugo natural, seguido de un filtrado para remover semillas y fibras macrométricas.
3. Pesado y Formulación: Dosificación precisa de los componentes e incorporación de sacarosa fina directamente en el jugo bajo agitación manual uniforme hasta lograr su disolución.
4. Hidratación de la Grenetina: Dispersión de la proteína gelificante en agua purificada fría, permitiendo un reposo de varios minutos hasta lograr su completo hinchamiento hidrodinámico.
5. Integración y Cocción Isotérmica: Calentamiento del jugo azucarado a fuego medio sin alcanzar el punto de ebullición para evitar la desnaturalización térmica de la grenetina; adición de la proteína hidratada y agitación continua hasta homogeneizar completamente la mezcla.
6. Vertido en Moldes y Gelificación: Dosificación cuantitativa de la solución líquida en moldes de silicona alimentaria, sometiéndolos a refrigeración controlada a una temperatura constante de 4 a 8 °C por un lapso mínimo de 4 horas para la fijación de la estructura elástica.
7. Desmolde y Acabado: Remoción de las piezas y empanizado superficial ligero con una mezcla de azúcar y ácido cítrico para mejorar la manipulación física y evitar la adhesión interparticular.

Proceso tecnológico del relleno tipo chamoy de cáscara de mandarina

Figura 2.
Diagrama de flujo del proceso de elaboración del relleno tipo chamoy de cascara de mandarina



El relleno agridulce fue elaborado simultáneamente recuperando la fracción externa del cítrico:

1. Selección, Lavado y Troceado: Recuperación de cáscaras en óptimo estado, lavado riguroso para eliminar impurezas superficiales y corte manual en porciones milimétricas.
2. Cocción Hidrotérmica: Tratamiento térmico de los trozos de cáscara en agua a ebullición media durante un periodo de 20 a 25 minutos con el propósito de ablandar el tejido lignocelulósico y solubilizar los principios amargos en exceso.

3. Homogeneización y Licuado: Procesamiento de las cáscaras ablandadas junto con su líquido de cocción en una licuadora industrial hasta obtener un puré espeso y homogéneo, el cual se sometió a tamizado para refinar su textura.
4. Integración y Balance de Sabor: Retorno de la base pastosa a la olla de cocción; adición secuencial de chile en polvo previamente hidratado en agua caliente, sacarosa, cloruro de sodio, jugo de limón fresco y pulpa de tamarindo.
5. Cocción Final y Ajuste Reológico: Calentamiento a fuego bajo durante 10 a 15 minutos con agitación continua para concentrar los sólidos disueltos y ajustar el balance sensorial picante-ácido.
6. Colado Fino y Envasado: Filtración exhaustiva a través de un tamiz fino para descartar trazas de fibra vegetal que pudieran obstruir los dispositivos de dosificación. Enfriamiento a temperatura ambiente y almacenamiento hermético en refrigeración (4-8 °C).
7. Microinyección del Relleno: Carga del chamoy fluido en un inyector volumétrico estéril y dosificación directa en el núcleo geométrico de las gomitas previamente cuajadas, logrando la estabilidad de la interfase líquido-gel.

RESULTADOS

La evaluación del producto final combinando la confitura de pulpa y el relleno de chamoy de cáscara demostró un perfil organoléptico y físico balanceado, cumpliendo con las expectativas planteadas en la etapa de diseño de la formulación alimentaria. Los atributos sensoriales determinados por el panel se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Evaluación sensorial de las confituras de mandarina con relleno de chamoy.

Característica Sensorial	Resultado Obtenido del Análisis
Color	Naranja brillante homogéneo y traslúcido.
Aroma	Cítrico e intenso, característico a mandarina fresca y notas especiadas.
Textura	Suave, con alta elasticidad reológica y masticabilidad adecuada.
Sabor	Perfil balanceado con notas iniciales dulces y cítricas, seguidas de un fondo acido y picante proveniente del núcleo.
Aceptación General	Favorable, con alto índice de agrado entre los evaluadores del panel.

Adicionalmente, se establecieron las especificaciones técnicas operativas del producto terminado para garantizar la estandarización y control de calidad en futuros lotes experimentales o de comercialización a nivel local, las cuales se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas y parámetros del producto terminado.

Parámetro Tecnológico	Especificación Establecida
Nombre Comercial	Gomitas de mandarina con relleno agridulce
Estado Físico	Semisólido (gel elástico con núcleo fluido)
Color y Olor	Naranja característico; aroma limpio a Citrus reticulata
Sabor	Dulce, ácido y picante balanceado
Vida Útil Comercial	10 a 15 días continuos bajo refrigeración
Tipo de Empaque	Bolsa de polipropileno grado alimenticio o recipiente hermético
Temperatura de Almacenamiento	4 a 8 °C (Refrigeración controlada)

A través del seguimiento físico de las muestras, se observó que el relleno de chamoy permaneció estable en el centro de la gomita, sin registrar fenómenos de migración de fluidos o separación de fases. Tecnológicamente, se validó de forma cuantitativa que la utilización de la cáscara reduce de manera significativa los desperdicios orgánicos del proceso global, confiriendo un valor agregado medible al subproducto.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la gomita a base de pulpa de mandarina con núcleo de chamoy sustentable de cáscara demostró ser una alternativa tecnológica, nutricional y ambiental enteramente viable dentro del ámbito de la tecnología de alimentos. Se dio cumplimiento total a los objetivos generales y específicos de la investigación mediante el diseño de un flujo de proceso estandarizado que aprovecha eficientemente entre el 40 % y el 50 % de la biomasa frutal que comúnmente se desecha como residuo orgánico. Las propiedades sensoriales del dulce final alcanzaron un balance organoléptico idóneo entre dulzor, acidez y picor, obteniendo un nivel de aceptación favorable por parte del panel evaluador. Adicionalmente, la estabilidad interfacial evidenciada en el producto y su vida útil de 10 a 15 días a temperaturas de 4 a 8 °C corroboran su aptitud técnica para ser producido y distribuido a pequeña escala en mercados locales y ferias escolares como un snack funcional y con una marcada identidad cultural mexicana.

BIBLIOGRAFÍA

1. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “Mandarina: cítrico que comienza en otoño”, Gobierno de México, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020, pp. 5-7.
2. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, “¿Qué hay detrás de la producción de mandarina?”, Gobierno de México, Dirección General de Transformación Agroindustrial, 2023, pp. 18-22.
3. FAOSTAT. (2021). Producción agrícola de mandarina en México. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
4. Gómez, L., & Ramírez, J. (2019). Características sensoriales y composición de confitería comercial. Alimentos Hoy, 12(2), 27–34.
5. Martínez, F., Delgado, H., & Ortiz, J. (2020). Gelificación de jugos de frutas con agentes texturizantes. Food Science & Technology, 23(4), 76–85.
6. López, C., & Sánchez, G. (2021). Formulación tradicional de chamoy y variantes contemporáneas. Gastronomía Mexicana, 8(1), 58–64
7. G. Evans, “Perspectiva on the development of high-toughness ceramics”, J. Am. Ceram. Soc., Vol. 73, 2, 1990, pp. 187-206.
8. Diario AS, “Ni a los 50 ni a los 60: la OMS afirma que esta es la edad a la que se deja de ser joven y comienza la vejez”, Ciencia y Salud, Vol. 12, 2025, pp. 45-48.
9. Instituto Mexicano de la Juventud, “¿Qué es ser joven?”, Gobierno de México, Sección de Artículos e Investigaciones, 2024, pp. 1-4.
10. MedlinePlus, “Vitaminas (C, B1, B2, B6, A) y Minerales (K, Ca, Mg, Fe, Zn, P) en la dieta humana”, Enciclopedia Médica de los Estados Unidos, National Library of Medicine, 2025, pp. 112-135.

CAMBIOS EN LA CALIDAD MICROBIOLOGICA DE TORTILLA DE MAÍZ ELABORADA EN EL BANCO DE ALIMENTOS DE MÉXICO BAMX SEDE TEPATITLÁN, DURANTE SU ALMACENAMIIENTO

María Dolores Méndez Robles[1], Shalem Dominique Sánchez Godinez[1], Laura Elena Iñiguez Muñoz[2] y Elia Margarita Rodríguez Chávez[2]

[1]Centro Universitario de los Altos, Universidad de Guadalajara, [2]Centro Universitario del Sur, Universidad de Guadalajara.
dolores.mendez@academicos.udg.mx

RESUMEN

El banco de alimentos de México BAMX sede Tepatitlán es una institución encargada de combatir el hambre en más de 6,000 familias; armando despensas alimentarias que se distribuyen en más de 85 comunidades en 14 municipios de la región, 13 en Jalisco y uno en Zacatecas[1]. Esta sede se destaca por contar con una zona de producción de tortilla de maíz, habiendo tenido en el año 2025 un impacto social notable, ya que se produjeron 112,516 kilogramos. La magnitud de esta producción implica una alta responsabilidad en garantizar que el alimento sea inocuo, por lo que el objetivo de este trabajo fue revisar la calidad microbiológica de la materia prima (harina de maíz) y tres lotes de tortilla, así como los cambios durante su conservación a tres temperaturas (6, 25 y 40 °C). Para los conteos de bacterias mesófilas aerobias (BMA), organismos coliformes totales (OCT) y hongos (H) se realizaron diluciones decimales que se inocularon aplicando la técnica de vaciado en placa, de acuerdo con las metodologías establecidas en la normatividad oficial mexicana. También se realizaron tinciones por el método de Gram para observar algunas morfologías bacterianas al microscopio. Los parámetros cuantificados en los lotes estudiados resultaron en cumplimiento de los límites establecidos para este tipo de productos. La mejor temperatura de conservación fue a 6 °C, donde se mantuvieron conteos bajos de los microorganismos estudiados durante 15 días. A las temperaturas restantes, fue evidente el desarrollo de BMA, OCT y H después de tres días. La refrigeración ralentiza el desarrollo de microorganismos patógenos y deterioradores, por lo que es importante concientizar tanto al productor como a los consumidores acerca de cuidar la cadena de frío. Un aspecto por señalar es que dentro de los conteos de BMA se detectó la presencia de bacterias que se sospecha son del género *Bacillus* en todos los lotes de harina y tortillas, esto es importante debido a que algunas especies son patógenas. Esta contaminación puede provenir de la materia prima, un mal almacenamiento de esta o bien de los productos intermedios y finales; otras vías podrían ser las manos de los trabajadores y superficies sucias, todo ello prevenible aplicando las buenas prácticas de manufactura (BPM). Así, aunque la tortilla de maíz que se elabora en el BAMX sede Tepatitlán cumple con los criterios microbiológicos de calidad, se tiene el reto de investigar la procedencia de la contaminación por el posible género *Bacillus*.

INTRODUCCIÓN

Los bancos de alimentos son instituciones sin fines de lucro que se dedican a la donación de alimentos remanentes a personas vulnerables a través de asociaciones benéficas, estos reciben productos excedentarios de los sectores agropecuarios, industriales, comerciales, entre otros[2]. El BAMX sede Tepatitlán de Morelos se destaca por contar con zonas de producción de panadería y tortillería, teniendo un especial cuidado con el manejo de estos productos considerados perecederos. Por lo general, las tortillas de maíz son colocadas en las despensas que van a ser distribuidas el mismo día que se producen, pero para las ocasiones en que se sobrepasa la cantidad requerida es necesario conocer las condiciones óptimas de conservación.

La vida de anaquel es el tiempo durante el cual un producto alimenticio puede conservar sus cualidades sensoriales, nutricionales y de seguridad establecidas bajo un conjunto conocido de condiciones de almacenamiento. El concepto es clave en la ciencia de los alimentos, ya que define

el intervalo en que un producto puede venderse sin perder calidad[3]. Esto es particularmente crucial ya que está relacionada con la seguridad del consumidor, la distribución del producto y la pérdida económica en la cadena de producción, entre otros.

En México, hay un consumo elevado de tortillas de maíz, considerándose un pilar de la dieta nacional por ser fuentes de energía a un precio accesible[4]. Sin embargo, debido a su alto contenido de humedad y almidón, son altamente perecederas, perdiendo flexibilidad y presentando moho después de 2 a 3 días a temperatura ambiente[5].

TEORÍA

El maíz es el cereal más importante en México, donde se consume principalmente como tortilla. Para elaborar este producto el grano se somete a un proceso de nixtamalización, que consiste en cocerlo en una solución acuosa de cal por 50 a 90 minutos, después reposarlo durante 14 a 18 horas y posteriormente retirar el agua de cocción para enjuagar varias veces el grano con el objetivo de eliminar el exceso de cal. Si se pretende producir harina es necesario moler el nixtamal y después deshidratarlo mediante un secador industrial hasta reducir el contenido de humedad por debajo del 10%; finalmente se realiza otra molienda antes del empacado para obtener una harina fina y homogénea[6]. En la fabricación de tortillas, la harina de maíz nixtamalizado se mezcla con agua para después moldearla en discos delgados y aplanados (diámetro de 160 mm a 250 mm y espesor de 1 a 2 mm). La cocción se realiza a 80 °C por 20 a 40 segundos, para consecutivamente enfriarlas mediante una banda transportadora[7]. La calidad final del producto será consecuencia de las BPM aplicadas en todo el proceso.

La normatividad oficial mexicana dicta como criterio de calidad microbiológica para la harina de maíz y las tortillas el conteo de organismos coliformes totales (OCT). Este conjunto de bacterias es un indicador microbiano que se relaciona directamente con el cuidado de la higiene al fabricar los alimentos, ya que los OCT incluyen géneros que se encuentran en el intestino humano/animal. Otro grupo de importancia son las bacterias mesófilas aerobias (BMA), que ayudan a determinar el conteo total de la población bacteriana del alimento y en consecuencia la calidad sanitaria tanto de la materia prima como producto intermedio y final. Los hongos (H) incluye a mohos y levaduras, los cuales señalan contaminación ambiental en la cadena de producción[8].

La tortilla es una fuente rica en nutrientes y alto contenido de humedad, esto la vuelve un sustrato ideal para BMA, OCT y H, los cuales pueden llegar y contaminar a los alimentos en cualquier etapa del proceso de producción. Si la población de microorganismos aumenta a causa de una mala conservación del producto, es cuando se produce el deterioro de este, ya que hay degradación de los componentes y producción de metabolitos que imparten sabores y olores desagradables. Así, la vida de anaquel de un alimento se encuentra correlacionada con la cantidad de microorganismos deterioradores que se encuentran presentes[8].

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación de las muestras. Se solicitó al encargado de proceso en la institución que el producto fuera enfriado a temperatura ambiente antes de envolver en papel revolución y guardar dentro de la bolsa de polietileno, tal como se maneja en el BAMX. El tamaño de las muestras fue de 500 g. El producto se dividió en tres grupos de almacenamiento: refrigerado (6 °C), ambiente (25 °C) y elevado (40 °C). Las mediciones se realizaron diariamente durante cinco días, por triplicado hasta observar descomposición para los productos almacenados a 25 y 40 °C; en lo que respecta a la temperatura de refrigeración se realizó seguimiento durante 17 días. Para los análisis microbiológicos se efectuaron diluciones decimales de acuerdo con la NOM-110-SSA1-1994 utilizando frascos con 90 mL de agua peptonada para la dilución primaria y tubos con nueve mL para las diluciones secundarias. En las diluciones primarias la homogenización se hizo en licuadora.

Bacterias mesófilas aerobias (BMA). Para cuantificar este grupo bacteriano se aplicó el procedimiento indicado en la NOM-092-SSA1-1994, donde se inoculó un mL de cada dilución

decimal en placas Petri por el método de siembra en profundidad. El medio de cultivo que se utilizó fue agar cuenta estándar y las condiciones de incubación 35 ± 2° C durante 48 ± 2 h en una estufa Terlab modelo MA70A.

Organismos coliformes totales (OCT). Se contabilizaron por la técnica de siembra en profundidad según la metodología citada en la NOM-113-SSA1-1994, donde se agregó un mL de cada dilución decimal en placas Petri. El medio de cultivo utilizado fue agar rojo bilis violeta utilizando una segunda capa de cobertura. Las condiciones de incubación 35° C durante 24 ± 2 h en una estufa Terlab modelo MA70A.

Conteo de hongos (H). Para su medición se aplicó la técnica que indica la NOM-111-SSA1-1994, donde se agregó un mL de cada dilución decimal en placas Petri por el método de inoculación en profundidad. El medio de cultivo utilizado fue agar papa dextrosa. Las condiciones de incubación a 25° C durante cinco días en una estufa de bajas temperaturas Fisher Scientific modelo 146 E.

Tinción de Gram y observación al microscopio. Para realizar observaciones de los cultivos al microscopio primero se realizaron frotis sobre portaobjetos colocando una gota de solución salina y extendiendo un poco de biomasa bacteriana, dejando secar y fijando con ayuda de un mechero Fisher. Para teñir se cubrió la preparación con cristal violeta durante un minuto, se enjuagó. A continuación, se añadió yodo-lugol y se dejó actuar un minuto, se enjuagó. Se realizó una decoloración con alcohol-acetona por escurrimiento hasta que no saliera más color, se enjuagó. Finalmente se tiñó con safranina dejando el colorante durante un minuto, se enjuagó. Una vez secos, los frotis teñidos se observaron con el objetivo 100 X utilizando aceite de inmersión mediante un microscopio Carl Zeiss modelo Primo Star.

Prueba de la catalasa. Se colocó biomasa bacteriana sobre un portaobjetos y se agregó una gota de peróxido de hidrógeno al 30 % buscando observar la presencia de burbujas para declarar como positiva la prueba.

RESULTADOS

Calidad inicial

La norma oficial mexicana donde se citan las especificaciones sanitarias es la NOM-187-SSA1-SCFI-2002 que dicta un límite permisible de 100 y menos de 30 UFC/g para OCT en harina de maíz nixtamalizada y en tortilla, respectivamente. Por lo anterior, se concluye que las muestras analizadas cumplen con los criterios de calidad microbiológica. En lo que respecta a BMA y H, no existen límites permisibles establecidos frente a los que se puedan comparar. Los resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Conteos microbiológicos de las muestras de harina y tortillas elaboradas en BAMX

Muestra	Fecha	BMA UFC/g	OCT UFC/g	H UFC/g
Harina de maíz	24/09/2025	80	No detectable	70
	07/10/2025	130	No detectable	120
	27/10/2025	300	No detectable	75
Tortilla de maíz	24/09/2025	95	No detectable	15
	07/10/2025	90	No detectable	No detectable
	27/10/2025	210	No detectable	20

Las BMA se trata de un grupo heterogéneo de microorganismos que comparten entre si la capacidad para formar colonias visibles en medios simples, bajo condiciones aerobias a temperatura de 35 °C; este grupo es grande ya que incluye todas aquellas bacterias que pueden desarrollarse en 24 horas. Dentro de las fuentes de contaminación de donde provienen se encuentran la tierra, el agua, los productos agrícolas, los insectos y los roedores. El hecho que estos microorganismos se encuentren indica una posible presencia de agentes patógenos, mismos que usan a los alimentos como transporte[9]. Para el caso de las muestras analizadas, pudieron contabilizarse unidades formadoras

de colonias pertenecientes a este grupo tanto en las muestras de harina como de tortilla, aunque no con la morfología típica de las BMA sino más bien de tamaño mediano a grande, forma irregular, bordes ondulados y superficie rugosa (figura 1); este tipo de colonias desarrollaron en todas las muestras de harina y tortilla. Estas características son propias del género *Bacillus*, mismo que es comúnmente encontrado en este tipo de producto[10]. Las pruebas que pudieron realizarse en el laboratorio fue la catalasa (resultando positivas en todos los casos) así como la tinción de Gram de los frotis, donde al ser observados al microscopio se encontraron bacilos Gram positivos normales y otros abultados (deformes) con zonas claras (sin colorante) en el centro, lo que se deduce son endosporas (figura 2).

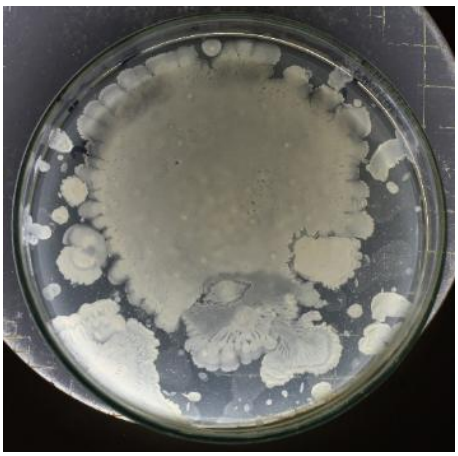


Figura 1. Colonias sospechosas de *Bacillus* desarrolladas en agar cuenta estándar a partir de muestras de harina de maíz

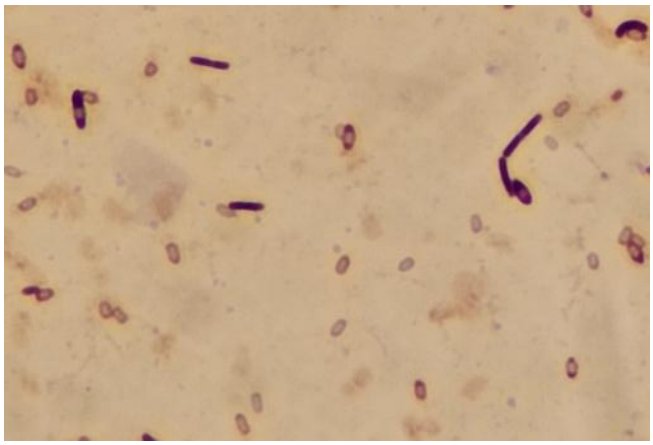


Figura 2. Observación de bacterias teñidas con la técnica de Gram

Las bacterias del género *Bacillus* son bacterias Gram positivas, pueden ser aeróbicas o anaeróbicas facultativas en forma de bastón y formadoras de endospora[10]. La especie *cereus* es un microorganismo patógeno el cual es muy resistente a los tratamientos térmicos, se ha propuesto como un causante de toxiinfección alimentaria, por lo general se encuentra en pequeñas cantidades en los alimentos (100 UFC/g)[11]. La contaminación puede provenir desde la materia prima utilizada para la elaboración de tortilla o distintas vías por las que pueden llegar los microorganismos como son a través de las manos del trabajador, superficies sucias, trapos sucios, equipos y utensilios con malas prácticas de higiene[12]. Existen dos clases de toxiinfección alimentaria causada por este microorganismo patógeno: diarreica (cuando genera su toxina al crecer en el intestino delgado) y emética (las toxinas se producen en el alimento). Los brotes que son tipo emético se suscitan en alimentos amiláceos (como la tortilla) y la presencia en los alimentos es indicativa de la actividad y proliferación del patógeno, así como el peligro ante la salud. Otra especie del género *Bacillus* es

subtilis, bacteria que también puede ser patógena por producir una toxina termoestable y ha sido aislada de tortillas, provocando enfermedades como gastroenteritis y diarrea[12].

Por otra parte, dentro del grupo de los hongos se encuentran los mohos. Estos microorganismos son contaminantes de la naturaleza ampliamente distribuidos, tienen la facilidad de crecer en medios ácidos y con carbohidratos, causando que los alimentos comiencen a tener un declive en su calidad e incluso son capaces de producir toxinas. Su presencia puede influir mucho en la vida útil del pan, quesos, yogurt y en especial las tortillas, ya que cumplen con todas las medidas necesarias para su proliferación: contenido de humedad aproximadamente de 38-46%, actividad de agua alrededor de 0.98, alto contenido de carbohidratos y almacenamiento a temperaturas cálidas cercanas a 25 °C.

Los mohos son indicadores de vida de anaquel, ya que con ellos se puede determinar la frescura en las tortillas, de igual forma ayuda a detectar riesgos de intoxicación, pues ciertas especies tienen la capacidad de liberar toxinas provocando enfermedades trasmitidas por alimentos. Realizar un análisis de este grupo de microorganismos incluso ayuda a identificar las fuentes de contaminación, ya que sus esporas pueden viajar a través del agua y el aire hasta llegar a las superficies que entrarán en contacto con los alimentos.

Calidad microbiológica durante las pruebas
Se les dio seguimiento mediante observación visual, así como con análisis microbiológicos a los tres grupos de muestras almacenados a distintas temperaturas. El desarrollo de mohos en el producto fue evidente al cuarto día en los productos conservados a 25 y 40 °C (figuras 3 y 4), esto debido a que son temperaturas adecuadas para su crecimiento y a la composición de la tortilla.



Figura 3. Inicio del desarrolló de mohos en tortilla conservada a 25 °C tras cuatro días de incubación

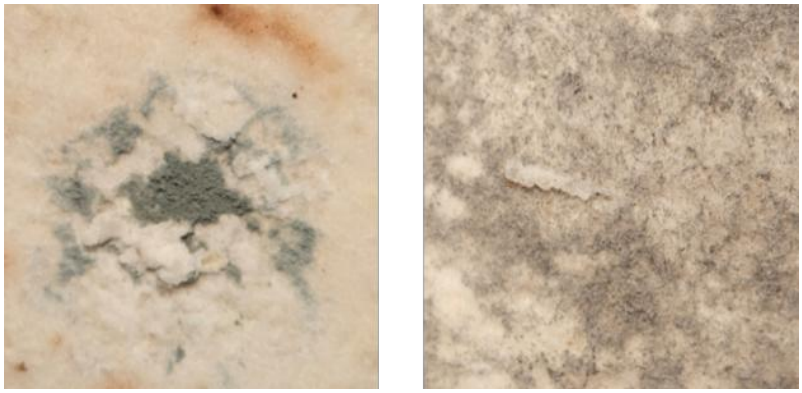


Figura 4. Crecimiento de moho con pigmentación verde después de cinco días de incubación a 25 °C (izquierda) y 40 °C (derecha)

Con respecto a los conteos, en las figuras 5 y 6 puede observarse el comportamiento de BMA y H a las distintas temperaturas, no habiéndose desarrollado OCT en ninguna de ellas. El número de BMA

incrementó considerablemente al cuarto día, sobre todo a 40 °C por ser la temperatura más cercana a la óptima de crecimiento para este grupo de bacterias, aunque también fue evidente el aumento a 25 °C mientras que a temperatura de refrigeración se mantuvieron sin cambio durante los 17 días en que se dio seguimiento. En lo que respecta a los mohos, el conteo más alto fue a 25 °C por ser su temperatura más favorable, aunque también hubo un desarrollo importante a 40 °C; con respecto a la temperatura de refrigeración se mantuvieron sin cambio durante 15 días, a partir de este tiempo ya fue evidente la reproducción. No hubo desarrollo de levaduras en ninguna de las temperaturas de estudio.

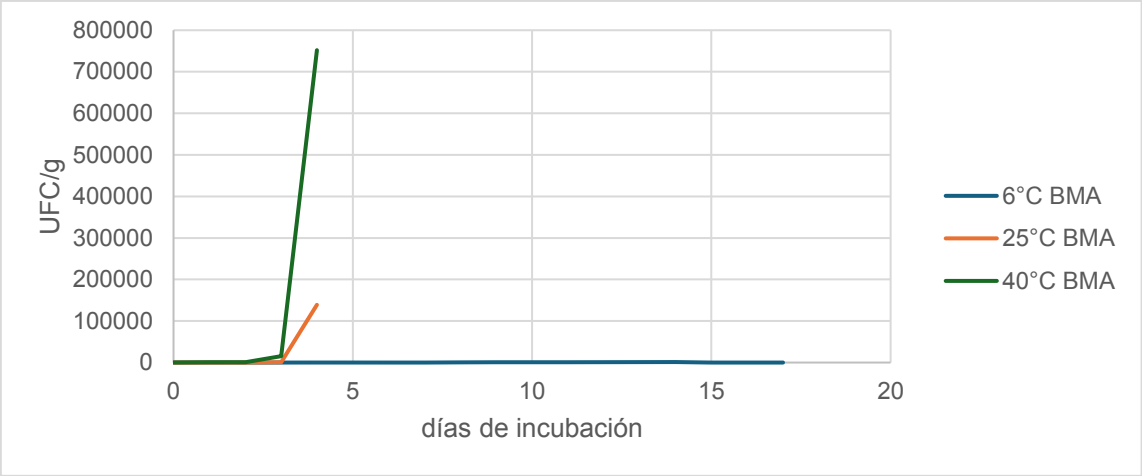


Figura 5. Comportamiento de las bacterias mesófilas aerobias durante las pruebas



Figura 6. Comportamiento de los H durante las pruebas

Al realizar los conteos de H, el moho que desarrolló fue de pigmentación verde (figura 7) y se realizaron recomendaciones a la institución de verificar la eficiencia de sus procedimientos de limpieza, ya que las esporas pueden llegar al producto durante el amasado o el moldeado.

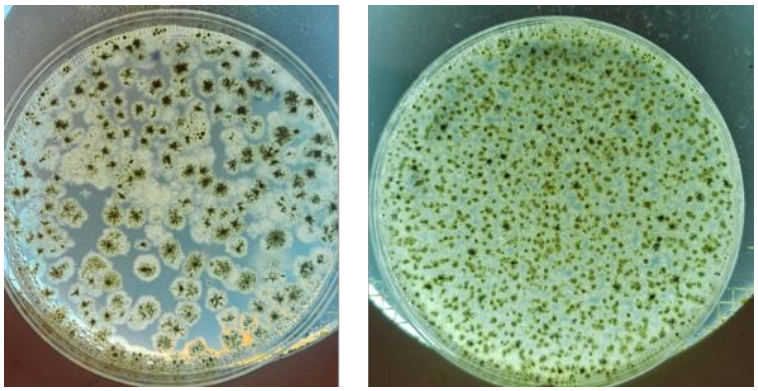


Figura 7. Conteo de mohos en tortilla conservada a 6 °C durante 16 días (izquierda) y 18 días (derecha) en la primera dilución de la muestra

CONCLUSIONES

Para las tortillas elaboradas por el BANMX la corta vida de anaquel se atribuye a la descomposición por microorganismos. Por el rápido crecimiento de mohos y BMA, no se recomienda almacenar el producto a temperatura ambiente pues no sería adecuado para su consumo más allá de tres días. Por otra parte, la refrigeración retrasa significativamente el desarrollo de mohos y evita la reproducción de BMA, por lo que es necesario conservar el producto a bajas temperaturas un plazo no mayor a 15 días; tiempo durante el cual no hay reproducción de microorganismos, el producto mantiene un buen sabor y su dureza no resulta ser un problema al ser calentado.

BIBLIOGRAFÍA

1. BAMX, “Banco de Alimentos de Tepatitlán”, 2026, https://www.bamxtepatitlan.org
2. M. Tapia, M. López. “Los bancos de alimentos y su impacto en la seguridad alimentaria”. Revista de Economía y Ciencias Sociales, 15(2), 2020, pp 45-62.
3. FAO. “El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos”. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2019. https://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf
4. INEGI. Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2020. https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2020/
5. Y. Meléndez Pastrana, M.A. Rodríguez Morachis, M.A. Rodríguez Medina, F. Zorrilla Briones. “Determinación de la vida útil de la tortilla de maíz adicionada con aceite esencial de tomillo a través de pruebas de vida acelerada”. RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, Vol. 12(23). 2021. https://doi.org/10.23913/ride.v12i23.1017
6. O. Paredes López, F. Guevara Lara, L.A. Bello Pérez. “La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz”. Ciencias, 92(092). 2010. https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14831
7. C.A. Gómez-Aldapa, E. Rangel-Vargas, A.M. Cruz-Gálvez, A.D. Román-Gutiérrez, J. Castro-Rosas. “Presence of coliform bacteria. fecal coliforms, Escherichia coli and salmonella on corn tortillas in central Mexico”. Food Control, 32(1), 2013, pp 31-34.
8. M.R. Torres-Vitela. “Seguridad alimentaria”. (L. O. O. Hernandez, Ed. 2016). Universidad de Guadalajara.
9. M. Á. H. Urzúa. “Microbiología de los Alimentos”. *(*Médica Panamericana, 2016).
10. Turnbull, P. C. B. (1996). “Bacillus*”*. Medical Microbiology. (NCBI Bookshelf, 1996). https://www-ncbi-nlm-nih-gov.translate.goog/books/NBK7699/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
11. S. J. Forsythe. “Alimentos seguros: microbiología”. (Blackwell Science Ltd, 2020).
12. Srivastava. “Tortilla mold spolaige: Causes and prevention”. (Kemin industries, Inc. USA. 2021).

PROPUESTA DE ALIMENTOS FUNCIONALES ENRIQUECIDOS CON SEMILLAS DE CHÍA: GALLETAS FUNCIONALES SABOR CACAO ENRIQUECIDAS CON HARINA DE CHÍA (*Salvia Hispanica L.)*

Dayana Itzel López Rodríguez[1], Xochitl Aparicio Fernández[1], Evelia Martínez Cano[1], Egla Yareth Bivian Castro[1], Carlos Enrique Ochoa Velasco[2], Paola Hernández Carranza[2]

[1]Centro Universitario de Los Lagos, Universidad de Guadalajara, [2]Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
dayana.lopez4810@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Los alimentos funcionales son aquellos que aportan un efecto benéfico a la salud, adicional a su contenido nutrimental, y de lo cual existe evidencia científica. Debido al incremento en los niveles de enfermedades no contagiosas, como obesidad, hipertensión, diabetes y otras, los consumidores buscan productos que satisfagan su apetito y gusto, además de que aporten beneficios a la salud. Las galletas son productos horneados elaborados con harina, huevo, grasa y azúcar o sal; se consumen regularmente como colaciones por su alta disponibilidad; sin embargo, su consumo habitual tiene un impacto negativo en la salud debido a su alto valor calórico y escaso contenido de ingredientes funcionales. Las semillas de chía (*Salvia hispanica* L.), originarias de México y Guatemala, destacan por su contenido en proteína, fibra, grasa saludable y compuestos bioactivos que proporcionan beneficios a la salud. El uso de estas semillas como ingrediente en la formulación de alimentos puede mejorar su perfil nutrimental y funcional; por lo que el objetivo del presente trabajo fue elaborar galletas con cacao (5%) y harina de trigo (Control, Sistema A=0%), y dos formulaciones sustituyendo parte de la harina de trigo con harina de chía (Sistema B=25% y Sistema C=50%), manteniendo constantes los demás ingredientes (azúcar, mantequilla, huevo, vainilla, sal y polvo para hornear). Se evaluó la composición nutrimental teórica, a partir de los ingredientes usados; se determinó el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, mediante técnicas espectrofotométricas y se evaluó su aceptación sensorial usando una escala hedónica de cinco puntos (1=me disgusta mucho, 5=me gusta mucho). Además, se comparó con un producto comercial, mostrando que el sistema B proporciona 63% más proteína, 62% más de fibra y 24% menos de grasa total, lo cual se refleja en una redacción de 40 Kcal/100 g. También los resultados de la composición nutrimental mostraron que la sustitución con harina de chía aumentó el contenido de proteína (+21.34%), grasa (+29.68%) y los compuestos fenólicos (+208.11%) en la muestra B respecto al control , que comparada con un producto similar proporciona 63% más proteína, 62% más de fibra y 24% menos de grasa total, lo cual se refleja en una reducción de 40 Kcal/100g. Asimismo, la capacidad antioxidante de las muestras con chía fue superior a la del control (+256.48%). En el sistema control, las puntuaciones de las características sensoriales analizadas (aspecto, sabor, olor, textura y aceptación general) estuvieron en el intervalo de 4 y 5 (me gusta y me gusta mucho, respectivamente). La sustitución parcial de harina de trigo por harina de chía impactó en el sabor, con un nivel de aceptación de 3.86 a 4.73, la textura presentó una aceptación de 3.38 a 4.43, y el olor presentó una aceptación de 4.05 a 4.28. Los resultados obtenidos respaldan el potencial funcional de la chía y la factibilidad de su incorporación a un producto de alto consumo para mejorar su perfil nutrimental y otorgarle carácter funcional.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de alimentos funcionales ha crecido de forma notable debido a la tendencia hacia dietas más saludables y preventivas frente a enfermedades crónicas (Enríquez-Estrella et al., 2022). Este tipo de alimentos contienen compuestos bioactivos, como péptidos bioactivos, carotenoides, vitaminas, compuestos fenólicos, fitoestrógenos, ácidos grasos y prebióticos e incluso microorganismos probióticos, que contribuyen a mejorar funciones fisiológicas específicas del organismo (Arias-Lamos et al., 2018). Así, se trabaja en el desarrollo de nuevos

alimentos se enfoquen no solo a la nutrición, sino en el aporte de beneficios adicionales a la salud, a través del uso de ingredientes con valor funcional.

En este contexto de alimentos funcionales las semillas de chía (*Salvia hispanica* L.) destacan por su notable perfil nutricional (**Tabla 1**), caracterizado por un elevado contenido de proteínas, fibra dietética, grasas y compuestos bioactivos, incluyendo antioxidantes y compuestos fenólicos (da Silva-Marineli et al., 2014). Originarias de México y Guatemala, estas semillas pequeñas, ovaladas y de color gris con manchas blancas y negras han sido utilizadas ampliamente por habitantes precolombinos de México y Guatemala tanto en la alimentación como con fines medicinales (Khalid et al., 2023; Vázquez-Ovando et al., 2010).

Tabla 1. Composición nutricional de las semillas de chía.

Componente	USDA (2024)	da Silva-Marineli et al., 2014
Proteína (por 100 g)	17 g	25.32 ± 0.21 g
Lípidos (por 100 g)	32.9 g	30.22 ± 0.08 g
Fibra dietética (por 100 g)	34.4 g	37.50 ± 1.07 g
Compuestos fenólicos (por 1 g)	-	0.94 ± 0.06 mg EAG / g
Actividad antioxidante (por 1 g)	-	436.61 ± 9.67 µmol TE / g
Energía (por 100 g)	490 kcal	576.50 ± 9.60 kcal

EAG: Equivalentes de ácido gálico. TE: Equivalentes de Trolox

Por otro lado, en productos horneados, la harina de trigo continúa siendo un ingrediente esencial por sus propiedades tecnológicas que confieren estructura, volumen y textura a los productos (Espinosa-Rodríguez, 2021). Sin embargo, su sustitución parcial por harina de chía abre la posibilidad de enriquecer estos alimentos con nutrientes y compuestos funcionales, mejorando su valor nutritivo; pudiendo convertir productos de consumo habitual, como las galletas, en productos con propiedades benéficas para el consumidor.

En este trabajo de investigación se desarrollaron galletas sabor cacao enriquecidas con diferentes proporciones de harina de chía, evaluando algunas características de su composición y su aceptación sensorial. El estudio busca demostrar que la chía puede ser un ingrediente clave para formular alimentos funcionales que satisfagan tanto las expectativas nutricionales como las sensoriales del consumidor.

METODOLOGÍA

Formulaciones para la elaboración de las galletas

La investigación fue desarrollada en el Laboratorio de Alimentos Funcionales del Centro Universitario de los Lagos (CULagos). Se prepararon tres formulaciones de galletas de cacao en las cuales se sustituyó un porcentaje de harina de trigo por harina de semillas de chía. La primera formulación (Sistema A= 0%) correspondió al control, fue elaborada sin adición de harina de chía, en la segunda formulación (Sistema B= 25%) se sustituyó el 25% de la harina de trigo por harina de chía y en la tercera formulación (Sistema C= 50%) se sustituyó el 50% de la harina de trigo por harina de chía. La **Tabla 2** muestra la distribución porcentual de los ingredientes utilizados en las formulaciones, la **Figura 1** muestran las etapas del proceso de elaboración de las galletas.

Tabla 2. Composición porcentual de las formulaciones desarrolladas.

Ingredientes	Sistema A (0%)	Sistema B (25%)	Sistema C (50%)
Harina de trigo	47.8	35.85	23.9
Harina de chía	0	11.95	23.9
Cacao	5	5	5
Azúcar	18.5	18.5	18.5
Mantequilla	15.2	15.2	15.2
Huevo	10.9	10.9	10.9
Esencia de vainilla	0.9	0.9	0.9
Sal	0.2	0.2	0.2
Polvo para hornear	1.5	1.5	1.5



Figura 1. Proceso de elaboración de galletas funcionales sabor cacao enriquecidas con harina de chía.

Evaluación sensorial

Se realizó una evaluación sensorial con la participación de 30 personas estudiantes del Centro Universitario de los Lagos (CULagos), quienes firmaron previamente un consentimiento informado para garantizar su participación voluntaria y un manejo ético de los datos recabados. La evaluación incluyó una escala hedónica de cinco puntos (1 = me disgusta mucho, 5 = me gusta mucho) para calificar características como aspecto, sabor, olor, textura y aceptación general. Asimismo, se aplicó una prueba ordinal de preferencia, en una escala del 1 al 3, donde 1 correspondió a la de mayor preferencia y 3 la de menor preferencia (Torricella-Morales et al., 2007).

Evaluación nutrimental y compuestos bioactivos

Determinación de humedad. La humedad de las galletas se determinó por secado en estufa. Cada muestra fue analizada por triplicado, utilizando cápsulas de porcelana que fueron llevadas a peso constante a 100°C durante 1 h. El proceso consistió en eliminar el agua de las muestras por evaporación, el tiempo y la temperatura fueron ajustados, en función al tipo de muestra, a 75°C durante 22 h. El contenido de humedad se calculó por diferencia de peso antes y después del secado de acuerdo con la ecuación 1 (Iturbe & Sandoval, 2011).

$$Contenido\ de\ humedad\ (\%) = \frac{Peso\ del\ agua\ evaporada\ (g)}{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)} \times 100 \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Cuantificación de proteína. Para la determinación de proteína se empleó el método micro-Kjeldahl, el cual se basa en la digestión de la muestra con ácido sulfúrico, convirtiendo el nitrógeno orgánico en ion amonio. Posteriormente, se realizó la alcalinización, destilación y captura del amoniaco, y su posterior titulación con una solución valorada de HCl; para cuantificar el porcentaje de proteína cruda presente en la muestra se empleó la ecuación 2, utilizando el factor de conversión general 6.25, aplicable a alimentos sin un factor específico reportado (Iturbe & Sandoval., 2011).

$$\%\ Proteína = \frac{(mL\ HCl) \times (N\ HCl) \times (meq\ N) \times (100) \times (Factor\ de\ proteína)}{Muestra\ (g)} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Determinación de extracto etéreo. Para la determinación de grasa se empleó el método de extracción directa con éter de petróleo en un equipo Soxhlet. Este procedimiento consistió en someter cada muestra seca, por duplicado, a extracción. Finalmente, el disolvente fue evaporado y el residuo graso obtenido se pesó, para calcular así el porcentaje de extracto etéreo total en cada muestra utilizando para ello la ecuación 3 (Iturbe & Sandoval., 2011).

$$Extracto\ etéreo\ (\%) = \frac{Peso\ del\ matraz\ con\ grasa\ (g) - Peso\ del\ matraz\ limpio\ (g)}{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)} \times 100 \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Determinación del contenido de compuestos fenólicos. La determinación de compuestos fenólicos totales se realizó mediante el método de Folin-Ciocalteau, el cual se basa en la reacción de óxido-reducción entre los compuestos fenólicos presentes en la muestra y el reactivo de Folin, formando un complejo de color azul cuya intensidad se mide a 765 nm en un espectrofotómetro y es proporcional a la concentración de compuestos fenólicos. Para la cuantificación se utilizó ácido gálico en una curva estándar (10-70 ppm) y los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra (mg EAG/g muestra) (Hernández-Carranza et al., 2016).

Determinación de la capacidad antioxidante por el método del DPPH. La capacidad antioxidante se determinó mediante el método del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH), el cual se basa en la reacción de los antioxidantes presentes en la muestra con los radicales DPPH, estabilizándolos y provocando un cambio de color de purpura a amarillo. La absorbancia se midió a 517 nm en un espectrofotómetro y, a partir de la diferencia de absorbancia, se calculó el porcentaje de estabilización del radical libre DPPH. Para la cuantificación, se empleó una curva estándar de Trolox (4-20 ppm) y los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de Trolox por gramo de muestra (mg ET/g muestra) (Hernández-Carranza et al., 2016).

Análisis estadístico

Las determinaciones se realizaron por duplicado. Los resultados obtenidos fueron analizados en el programa JASP, mediante comparación de medias con un nivel de confianza de $\alpha = 0.05$.

Declaración nutrimental

Se elaboró una tabla de declaración nutrimental teórica a partir de la información proporcionada en las etiquetas de los ingredientes utilizados. Posteriormente, estos valores fueron ajustados con base en los resultados obtenidos en los análisis químicos realizados a las formulaciones en el Laboratorio

de Bioquímica del Centro Universitario de los Lagos (CULagos), con el fin de presentar una información nutrimental más precisa y representativa del producto final.

RESULTADOS

Propiedades nutricionales y compuestos bioactivos de galletas de cacao enriquecidas con chía

En la **Tabla 3** se muestran los resultados de los análisis de humedad, cuantificación proteína, grasa total, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de cada una de las formulaciones de las galletas (Sistemas A, B y C).

Tabla 3. Contenidos de humedad, proteína, extracto etéreo, compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de galletas sabor cacao, con y sin chía. sin y con chía.

Sistema	Humedad (%)	Proteína (%)	Grasa total (%)	Compuestos fenólicos totales (mg EAG / g)	Capacidad antioxidante (mg ET/g)
A	10.09 ± 0.14^{a}	8.34 ± 0.17^{a}	14.99 ± 0.03^{a}	1.11 ± 0.04^{a}	1.31 ± 0.05^{a}
B	10.62 ± 0.06^{a}	10.12 ± 0.18^{b}	19.44 ± 0.64^{b}	3.42 ± 0.09^{b}	4.67 ± 0.16^{b}
C	6.56 ± 0.22^{b}	12.38 ± 0.83^{c}	23.29 ± 0.56^{c}	1.19 ± 0.02^{a}	1.01 ± 0.31^{a}

Promedio ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes en columna indican diferencia estadística significativa ($p<0.05$).

En los resultados presentados en la **Tabla 3** se observa que el contenido de humedad fue menor en el sistema con mayor porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de chía. De acuerdo con el estudio de Espinosa-Rodríguez (2021), la cantidad de chía tiene gran influencia con la humedad, existe una relación estrecha entre la humedad y la dureza, a menor contenido de humedad mayor es la dureza del producto. Aunque en las galletas sabor cacao enriquecidas con chía no se les realizó un análisis de dureza, el análisis sensorial permitió identificar esta característica. En los comentarios, 12 evaluadores coincidieron en que los sistemas B y C presentaron una textura ligeramente más dura en comparación el sistema A. Además, es importante considerar que la humedad no solo influye en la textura, sino también en la vida útil de las galletas, ya que un menor contenido de agua reduce el riesgo de proliferación de microorganismos.

Por otro lado, se observó un incremento significativo en el contenido de proteína, proporcional al porcentaje de sustitución de harina de trigo por harina de chía (**Tabla 3**); el sistema control (A) presentó un contenido de 8.34 ± 0.17, mientras que los sistemas B y C alcanzaron valores de 10.12 ± 0.18 y 12.38 ± 0.83, respectivamente. Esto representa un incremento aproximado del 21.34% para el sistema B y del 48.44% para el sistema C respecto al control (sistema A). Este comportamiento coincide con lo reportado por Silveira-Coelho et al. (2015) y Aranibar-Vaca (2020), quienes en estudios con productos panificables identificaron un incremento en la proteína al aumentar el nivel de sustitución de harina de chía. Los autores reportan un incremento del 15% de proteína, respecto a su sistema control. Estos resultados evidencian el potencial de la chía para mejorar el perfil nutricional de productos.

Los resultados del contenido de extracto etéreo también evidencian un incremento significativo proporcional a la adición de harina de chía a cada sistema (**Tabla 3**). El sistema control (A) presentó un valor de 14.99 ± 0.03, mientras que los sistemas B y C registraron 19.44 ± 0.64 y 23.29 ± 0.56, respectivamente. Esto representa un aumento aproximado del 29.68% para el sistema B y del 55.37% para el sistema C en comparación con el sistema control. Este aumento se atribuye al elevado contenido de lípidos en la semilla de chía (**Tabla 1**), que aportan un perfil graso de calidad nutricional.

El sistema control (A) presentó un contenido de compuestos fenólicos totales de 1.11 ± 0.04 mg EAG/g muestra (**Tabla 3**). El sistema B presentó el valor más alto de compuestos fenólicos totales (3.42 ± 0.09 mg EAG/g muestra), es decir el contenido de fenólicos se triplicó con la sustitución de un 25% de harina de trigo por chía, evidenciando que una sustitución parcial favoreció el enriquecimiento de compuestos fenólicos del producto. Sin embargo, el contenido fenólico cuantificado en el sistema C, con sustitución del 50% fue similar al del sistema A (1.19 ± 0.017 mg EAG/g muestra); considerando que la harina de chía es una fuente reconocida de compuestos fenólicos, este resultado podría estar asociado a interferencias de la composición de la matriz, particularmente por su mayor contenido lipídico, lo que pudo afectar la extracción o cuantificación de los compuestos fenólicos mediante el método de Folin-Ciocalteu.

La presencia de compuestos fenólicos en la formulación control es atribuible al contenido de estos compuestos en el cacao y la harina de trigo. El cacao es una fuente rica en polifenoles; asimismo, la harina de trigo contiene compuestos fenólicos entre los que destacan los derivados del ácido ferúlico, flavonoides y otros compuestos bioactivos que contribuyen al contenido total de fenoles en el producto, por lo que, estos ingredientes además de contribuir con el objetivo de dar textura, estructura, volumen, color y sabor al producto también aportan actividad bioactiva (Chan et al., 2012; Sorrenti et al., 2020). El mayor contenido de compuestos fenólicos en la formulación B está relacionado con la presencia de estos compuestos en la chía, entre los que se encuentran importantes niveles de ácido cafeico, ácido clorogénico, ácido rosmarínico, ácido gálico, quercetina, miricetina y kaempferol (Knez et al., 2019; Martínez-Cruz & Paredes-López, 2014). Mientras que el menor contenido de fenólicos en la formulación C podría explicarse por la degradación térmica de estos durante el horneado, o por una mayor cantidad de interacciones entre los fenólicos y macromoléculas como proteínas, fibra y lípidos presentes en mayores concentraciones dentro de la matriz alimentaria, reduciendo la eficiencia de extracción para su cuantificación. Lo anterior sugiere que una mayor cantidad de ingrediente funcional no necesariamente se traduce en una mayor concentración detectable de compuestos bioactivos en el producto final.

Cabe mencionar que los niveles de compuestos fenólicos en los productos naturales son muy variables, debido a que son sintetizados en respuesta a las condiciones del entorno, tales como, zona de cultivo, diferencias en el entorno, cambios climáticos, disponibilidad de nutrientes, año de cultivo, etapa de desarrollo y procesamiento posterior a la cosecha, condiciones del suelo, entre otros. En conjunto estos factores afectan directamente en la composición química de la semilla de chía (Mohd-Ali et al., 2012).

La capacidad antioxidante mostró una tendencia semejante al contenido de compuestos fenólicos totales (**Tabla 3**). El sistema control (A) y el sistema C presentaron valores de 1.31 ± 0.05 y 1.01 ± 0.031 mg ET/g muestra, respectivamente, menores, al de la formulación B que mostró el valor más alto (4.67 ± 0.16 mg ET/g), 3.56 veces mayor que el control. El aumento en la capacidad antioxidante observado en el sistema B puede atribuirse a la presencia de antioxidantes contenidos en las semillas de chía, tales como, tocoferoles, fitoesteroles, carotenoides y compuestos polifenólicos. Además, tanto el cacao como la harina de trigo contienen compuestos bioactivos, como tocoferoles, carotenoides y ácidos fenólicos, los cuales, son capaces de actuar como captadores de radicales libres. En conjunto, el contenido de estos compuestos bioactivos proporciona un producto con capacidad para eliminar radicales libres, quelar iones y donar hidrógenos; su consumo puede beneficiar en actividades biológicas, como los efectos antioxidantes, antienvejecimiento, antiinflamatorio, antihipertensivo y anticancerígeno (Chan et al., 2012; Knez Hrnčič et al., 2019; Sorrenti et al., 2020).

La reducida capacidad antioxidante medida en el sistema C sugiere que concentraciones elevadas de harina de chía podrían favorecer fenómenos de degradación térmica o consumo de antioxidantes durante el procesamiento. Además, el mayor contenido de lípidos poliinsaturados presentes en la chía podría incrementar la susceptibilidad a procesos oxidativos durante el horneado, provocando una reducción en la capacidad antioxidante final del sistema. Los resultados indican que una sustitución intermedia de harina de chía permite obtener el mejor equilibrio entre enriquecimiento funcional y conservación de compuestos bioactivos.

Análisis sensorial de galletas de cacao enriquecidas con chía

La **Tabla 4** muestra los resultados del análisis sensorial de las galletas sabor cacao enriquecidas con harina de chía, donde se evaluaron los atributos de aspecto, sabor, olor, textura y aceptación general. La formulación control (Sistema A) fue la mejor evaluada, obteniendo las puntuaciones más altas en todos los atributos. A medida que se incrementó el porcentaje de harina de chía, se redujeron los puntajes obtenidos en los sistemas B y C, excepto en el olor donde no se observan diferencias significativas. De acuerdo con las evaluaciones de los participantes, los sistemas B y C presentaron una textura más dura, esto explica la disminución en las calificaciones de textura y aceptación general. Asimismo, cuatro de los participantes dieron a conocer que al terminar de degustar la galleta queda un sabor a chía, asociado al mucílago presente en las semillas, cuya textura les resultó poco agradable.

Tabla 4. Resultados de la evaluación sensorial de galletas enriquecidas con chía.

Sistema	Aspecto	Sabor	Olor	Textura	Aceptación general
A	4.5 ± 0.76^{a}	4.73 ± 0.51^{a}	4.28 ± 0.77^{a}	4.43 ± 0.61^{a}	4.63 ± 0.53^{a}
B	4.40 ± 0.76^{ab}	3.93 ± 0.81^{b}	4.16 ± 0.86^{a}	3.38 ± 1.08^{b}	3.98 ± 0.73^{b}
C	3.85 ± 0.97^{b}	3.86 ± 0.99^{b}	4.05 ± 0.88^{a}	3.56 ± 1.17^{b}	3.83 ± 0.87^{b}

Promedio ± desviación estándar. Letras superíndices diferentes en columna indican diferencia estadística significativa ($p<0.05$).

En la **Figura 2** se muestra la preferencia de los participantes hacia cada una de las formulaciones, sobresale notablemente la preferencia por la galleta control (Sistema A), en comparación con los sistemas B y C.

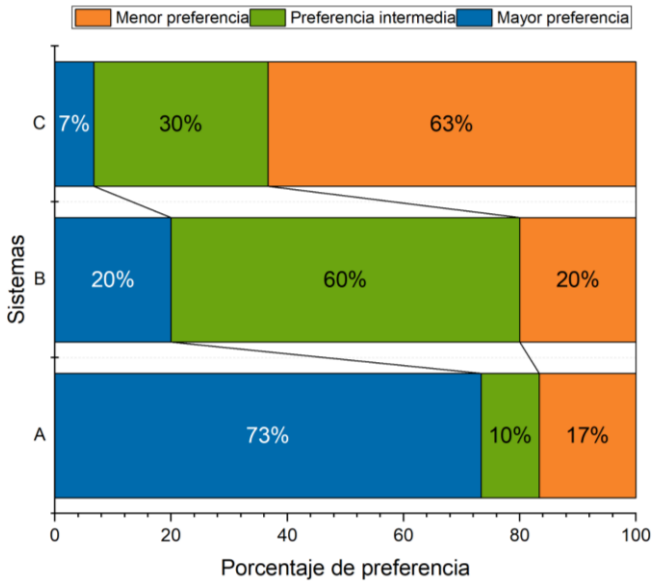


Figura 2. Gráfica comparativa de la preferencia de cada sistema de las galletas adicionadas con harina de chía.

En la **Tabla 5** se muestra la comparación entre la declaración nutrimental teórica y la ajustada de las galletas sabor cacao enriquecidas con harina de chía. La declaración nutrimental teórica se obtuvo a partir de la información de las etiquetas de los ingredientes empleados, mientras que la ajustada

se obtuvo tomando en cuenta los resultados de las cuantificaciones de proteína, grasa total, compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante, realizados en el Laboratorio de Bioquímica del Centro Universitario de los Lagos (CULagos) para obtener así una declaración nutrimental más precisa de los productos finales.

En términos generales, las diferencias encontradas fueron mínimas. El contenido energético mostró una disminución en las formulaciones A y B tras el ajuste, mientras que en la formulación C se mantuvo prácticamente igual. De manera similar, los valores de proteína y grasa total en la formulación A y B fueron ligeramente inferiores a los calculados teóricamente, por su parte los resultados experimentales de la formulación C fueron muy similares a los calculados teóricamente.

El contenido de sodio, fibra dietética e hidratos de carbono disponibles son iguales en la estimación teórica y ajustada, ya que no se realizaron análisis experimentales para estos componentes.

En cuanto a los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante, su cálculo teórico no fue posible, debido a que estos no se reportan en las etiquetas nutrimentales de los ingredientes utilizados, aunque se investigó en la literatura, estos valores suelen presentar gran variabilidad.

En general, los resultados muestran que la incorporación de harina de chía causó un aumento en proteína y grasas totales, mientras que, para compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante, el sistema B (25% harina de chía) presentó el mayor contenido de estos, debido a ello, este porcentaje de sustitución representa el equilibrio óptimo de sustitución, para un aporte funcional significativo.

Tabla 5. Declaración nutrimental de las galletas sabor cacao enriquecidas con chía, en porción de 100 g.

Parámetro	Sistema A Teórica	Sistema A Ajustado	Sistema B Teórica	Sistema B Ajustado	Sistema C Teórica	Sistema C Ajustado
Contenido energético (kcal)	441.27	425.48	466.45	454.52	470.70	470.73
Contenido energético (kJ)	1854.56	1789.55	1956.57	1907.39	1970.99	1971.49
Proteína (g)	8.49	8.34	10.34	10.12	11.67	12.38
Grasa total (g)	16.68	14.99	20.66	19.44	23.60	23.29
Grasa saturada (g)	8.89	8.89	9.35	9.35	9.40	9.40
Grasa trans (g)	0	0	0	0	0	0
Hidratos de carbono disponibles (g)	64.29	64.29	59.77	59.77	52.91	52.91
Azúcares (g)	21.05	21.05	21.05	21.05	20.15	20.15
Azúcares añadidos (g)	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50
Fibra dietética (g)	3.35	3.35	7.33	7.33	18.50	18.50
Sodio (mg)	22.31	22.31	24.30	24.30	25.17	25.17
Compuestos fenólicos totales (mg EAG)	-	111.14	-	342.44	-	118.55

Capacidad antioxidante (mg ET)	-	130.91	-	466.95	-	100.98

De acuerdo con los resultados de los análisis nutrimentales, compuestos bioactivos y sensorial el sistema B fue el que presentó un equilibrio entre funcionalidad, estabilidad y aceptación. Con el fin de evidenciar su potencial como alimento funcional, la declaración nutrimental ajustada de este sistema fue comparada con la declaración nutrimental de un producto comercial similar (**Tabla 6**). Los resultados de esta comparación mostraron que la formulación desarrollada presentó un perfil nutrimental más favorable, destacando un mayor contenido de proteína (10.12 g/100 g contra 6.2 g/100 g) y fibra dietética (7.33 g/100 g contra 4.50 g/100 g), así como una menor cantidad de grasa total (19.44 g/100 g contra 25.05 g/100 g), lo cual en conjunto se refleja en una reducción de 40 kcal/100 g. Adicionalmente, la presencia de compuestos bioactivos, tales como fenoles y antioxidantes en el sistema B son parámetros que no se reportan en la información nutrimental del producto comercial. Por lo tanto, las galletas de cacao sustituidas con 25% de harina de chía pueden considerarse una alternativa saludable entre este tipo de alimentos.

Tabla 6. Comparación de declaración nutrimental de un producto comercial contra la declaración nutrimental de la formulación B.

Producto comercial

Producto comercial	Por 100 g
Contenido energético* kcal	**494**
kj	**2067**
Proteínas	6.2 g
Grasas totales	25.5 g
Grasas saturadas	**16.1 g**
Grasas trans	**205 mg**
Hidratos de carbono disponibles	59.9 g
Azúcares	21.5 g
Azúcares añadidos	**21.4 g**
Fibra dietética	4.5 g
Sodio	**187 mg**

Declaración nutrimental sistema B

Formulación B	Por 100 g
Contenido energético* kcal	**454.52**
kJ	**1907.39**
Proteínas	10.12 g
Grasas totales	19.44 g
Grasas saturadas	**9.35 g**
Grasas trans	**0 mg**
Hidratos de carbono disponibles	59.77 g
Azúcares	21.05 g
Azúcares añadidos	**18.50 g**
Fibra dietética	7.33 g
Sodio	**24.30 mg**
Compuestos fenólicos totales	342.44 mg
Capacidad antioxidante	466.95 mg
Con base a la NOM-051-SCFI/SSA1-2010	

CONCLUSIÓN

Las galletas sabor cacao enriquecidas con un 25% de harina de chía representan una alternativa innovadora de alimento funcional con beneficios potenciales para la salud. Son sensorialmente aceptables y presentan un mejor perfil nutrimental (mayor aporte de proteína y fibra; y menor cantidad de grasa total) y funcional (aporte de ácidos grasos esenciales, compuestos fenólicos y efecto antioxidante) respecto a la galleta sabor cacao sin adición de chía y a productos comerciales similares.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aranibar-Vaca, C. (2020). Utilización de chía *(Salvia hispanica* L.) en la formulación de productos tradicionales elaborados a base de harina de trigo [Tesis doctoral]. Universidad Nacional De Córdoba. http://hdl.handle.net/11086/548618
2. Arias-Lamos, D., Montaño-Díaz, L. N., Velasco-Sánchez, M. A., & Martínez-Girón, J. (2018). Alimentos funcionales: avances de aplicación en agroindustria. *Revista Tecnura, 22(57)*, 55-68. https://doi.org/10.14483/22487638.12178
3. Chan, K. W., Khong, N. M. H., Iqbal, S., & Ismail, M. (2012). Simulated gastrointestinal pH condition improves antioxidant properties of wheat and rice flours. *International Journal of Molecular Sciences,13(6)*, 7496-7507. https://doi.org/10.3390/ijms13067496

4. da Silva-Marineli, R., Aguiar-Moraes, É., Alves-Lenquiste, S., Teixera-Godoy, A., Nogueira-Eberlin, M. & Maróstica-Júnior, M. R. (2014). Chemical characterization and antioxidant potential of Chilean chia seeds and oil (*Salvia hispanica* L.). *Food Science and Technology, 59(2)*, 1304-1310. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.014
5. Enríquez-Estrella, M., Torres-Caicedo, L., Monar-Vega, K. & Uvidia-Cavadiana, Hernán. (2022). Alimentos funcionales la tendencia de consumo del siglo XXI. *Revista Científica Agropecuaria, 1(3)*, 10-19. https://reciena.espoch.edu.ec/index.php/reciena/article/view/44/42
6. Espinosa-Rodríguez, E. D. (2021). *Estudio de la sustitución de harina de trigo por harina de semillas de chía en la elaboración de productos horneados como tortas y galletas* [Trabajo de Pregrado]. *Universidad de los Andes*. https://hdl.handle.net/1992/53366
7. Hernández-Carranza, P., Ávila-Sosa, R., Guerrero-Beltrán, J. A., Navarro-Cruz, A. R., Corona-Jiménez, E. & Ochoa-Velasco, C. E. (2016). Optimization of antioxidant compounds extraction from fruit by-products: apple pomace, orange and banana peel. *Journal of Food Processing and Preservation, 40(1),* 103–115. https://doi.org/10.1111/jfpp.12588
8. Iturbe, F., & Sandoval, J. (2011). *Análisis de alimentos fundamentos y técnicas.* Universidad Nacional Autónoma de México.
9. Khalid, W., Arshad, M. S., Aziz, A., Rahim, M. A., Qaisrani, T. B., Afzal, F., Ali, A., Ranjha, M. M. A. N., Khalid, M. Z., & Anjum, F. M. (2023). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): A therapeutic weapon in metabolic disorders. *Food Science & Nutrition, 11,* 3-16. https://doi.org/10.1002/fsn3.3035
10. Knez-Hrnčič, M., Ivanovski, M., Cör, D., & Knez, Ž. (2019). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): An overview-phytochemical profile, isolation methods, and application. *Molecules, 25(1),* 11. https://doi.org/10.3390/molecules25010011
11. Martínez-Cruz, O. & Paredes-López, O. (2014). Phytochemical profile and nutraceutical potential of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) by ultra high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A, 1346*, 43-48. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.04.007
12. Mohd-Ali, N., Yeap, S. K., Ho, W. Y., Beh, B. K., Tan, S. W., & Tan, S. G. (2012). The promising future of chia, *Salvia hispanica* L. *Journal of Biomedicine & Biotechnology, 2012,* Article 171956. https://doi.org/10.1155/2012/171956
13. Secretaria de economía (2010). NOM-051-SCFI-SSA1-2010, Especificaciones generales *de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria*. Diario Oficial de la Federación.
14. Silveira-Coelho, M., de las Mercedes, M. & Salas-Mellado, M. (2015). Effects of substituting chia (*Salvia hispanica* L.) flour or seeds for wheat flour on the quality of the bread. LWT – *Food Science and Technology, 60:2*, 729-736. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.033
15. Sorrenti, V., Ali, S., Mancin, L., Davinelli, S., Paoli, A., & Scapagnini, G. (2020). Cocoa Polyphenols and gut microbiota interplay: Bioavailability, prebiotic effect, and Impact on human health*. Nutrients, 12(7)*, 1908. https://doi.org/10.3390/nu12071908
16. Torricella-Morales, R. G., Zamora-Utset, E., & Pulido-Alvarez, H. (2007). *Evaluación sensorial aplicada a la investigación, desarrollo y control de la calidad en la industria alimentaria* (2 ed.). Editorial Universitaria.
17. U.S. Department of Agriculture. (2024). Chia seeds. FoodData Central. https://fdc.nal.usda.gov/food-details/2710819/nutrients.
18. Vázquez-Ovando, J. A., Rosado-Rubio, J. G., Chel-Guerrero L. A. & Betancur-Ancona D. A. (2010). Procesamiento en seco de harina de chía (*Salvia hispanica* L.): caracterización química de fibra y proteína. *CyTA – Journal of Food, 8(2)*, 117-127. https://doi.org/10.1080/19476330903223580

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUA DE LAGO DE GUADALUPE

Diana Isabel Osorio Sanchez, Jatziri López García, Ivan Arroyo Ordoñez, Sofia Valentina Calvillo Beltran, Ximena Ramírez Tapia, José Ángel Flores Mejia, Daniela Mirely García Lopez, Adrián Eliseo Catalán Martinez.

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli Lago de Guadalupe.
1323232022@upci.edu.mx

RESUMEN

El Lago de Guadalupe, ubicado en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, presenta un proceso avanzado de eutrofización derivado de descargas de aguas grises y escurrimientos urbanos, lo que provoca el deterioro de sus funciones ecológicas. En este contexto, los humedales artificiales replican procesos biogeoquímicos de los humedales naturales mediante sustratos granulares y macrófitos que oxigenan la rizosfera, ofreciendo así una alternativa sustentable para la remoción de nutrientes y materia orgánica. Por ello, con el fin de proponer una solución contextualizada, se planteó el diseño, construcción y la evaluación de un prototipo de humedal artificial para la remediación del agua del lago de Guadalupe basado en criterios técnicos para sistemas comunitarios y considerando la factibilidad operativa local. En cuanto a la metodología, ésta contempló un diagnóstico fisicoquímico y microbiológico del agua durante los periodos de estiaje y lluvias, evaluando parámetros como demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, sólidos suspendidos y coliformes fecales. Se seleccionó el sitio en función de la topografía, la disponibilidad de superficie y la cercanía a puntos de aporte; posteriormente, se desarrolló el diseño paramétrico del sistema, integrando una geomembrana de PVC como barrera impermeable y un sustrato a base guata, gravas finas, gravas gruesas y una capa superior de tezontle para favorecer zonas anóxicas controladas. Asimismo, se consideró un esquema híbrido con una celda de flujo horizontal subsuperficial para el pretratamiento de aguas grises y una celda de flujo superficial libre para el pulimento del efluente y el soporte de la biodiversidad. Para garantizar la continuidad del proceso, el diseño propuesto incorpora una operación con bomba para mantener un flujo constante en el humedal, lo que reduce la huella operativa y facilita el mantenimiento comunitario. La selección de macrófitas nativas incluyó especies como *Juncus*, *Tracheophyta* y *Acanthus*, debido a su adaptabilidad al clima templado subhúmedo y su capacidad de oxigenación radicular. De esta manera, se obtuvo una disminución significativa de sólidos suspendidos y nutrientes, con una mejora en la estabilidad del sistema y una reducción de olores, de acuerdo con el desempeño reportado en humedales de tratamiento y experiencias de aplicación a escala comunitaria. Así mismo, la integración del sustrato y las especies seleccionadas favorecerá la remoción de nutrientes y la recuperación de las funciones ecológicas del lago. La implementación de humedales artificiales constituye una estrategia viable, resiliente y de bajo costo operativo para el saneamiento de cuerpos de agua periurbanos.

INTRODUCCIÓN

El deterioro de los cuerpos de agua dulce es uno de los desafíos ambientales más apremiantes a nivel global, y el lago de Guadalupe no es la excepción. Bajo una fuerte presión antropogénica, este ecosistema presenta acumulación de contaminantes y deterioro de la calidad del agua, afectando la biodiversidad local, su potencial de uso recreativo y social. En este contexto, los humedales artificiales de flujo superficial constituyen una estrategia prometedora, al reproducir procesos depurativos de los humedales naturales y favorecer la eliminación de sedimentos u otros contaminantes mediante la interacción de sustrato, vegetación y microorganismos.

El presente trabajo aborda el diseño, construcción y evaluación de un prototipo de humedal artificial de flujo superficial concebido específicamente para la remediación del agua. Mediante este enfoque experimental, se busca evaluar la eficiencia del sistema en la mejora de parámetros fisicoquímicos

y microbiológico del agua, así como sentar bases para contribuir a la restauración y conservación de este valioso recurso hídrico.

TEORIA

Los humedales artificiales de flujo superficial son sistemas de tratamiento de aguas diseñados para replicar los procesos de depuración que ocurren en humedales naturales. Su funcionamiento se basa en la interacción sinérgica de tres componentes principales: el sustrato (gravas, tezontle y guata), la vegetación hidrófita (plantas adaptadas a condiciones de saturación de agua) y la comunidad microbiana que se establece en las raíces y en el sustrato.
Principios fundamentales:

1. Filtración física: El sustrato retiene sólidos suspendidos y partículas gruesas, mejorando la claridad del agua.

2. Adsorción e intercambio iónico: Los materiales como el tezontle (roca volcánica) poseen alta porosidad y capacidad de retención de contaminantes como metales pesados y nutrientes.

3. Degradación biológica: Los microorganismos adheridos a las raíces y al sustrato descomponen materia orgánica, transforman compuestos nitrogenados y fosforados.

4. Absorción por plantas: La vegetación toma nutrientes para su crecimiento, reduciendo la eutrofización.

5. Sedimentación: El flujo superficial controlado permite que partículas más pesadas se depositen en el fondo.

En el contexto del Lago de Guadalupe, que presenta deterioro por presión antropogénica, es decir, contaminación, sólidos suspendidos, materia orgánica, el humedal artificial actúa como un sistema de remediación pasivo, de bajo costo energético y operación simple, ideal para un posterior escalamiento.

REPORTE EXPERIMENTAL

El prototipo se construyó siguiendo una metodología secuencial para garantizar la replicabilidad y eficiencia del sistema.

1. Identificación y preparación de los materiales: Se realizó una selección de los componentes necesarios: un recipiente impermeable el cual fue acondicionado como contenedor, grava fina, grava gruesa, guata y tezontle como sustratos, así como las plantas hidrófitas Juncus, Tracheophyta y Acanthus.



Imagen 1. Materia prima para la elaboración de sustrato

2. Lavado y sanitización de la materia prima: La grava fina, la grava gruesa y el tezontle fueron sometidos a un lavado exhaustivo con agua potable, seguido de un proceso de sanitización para eliminar patógenos, materia orgánica residual y partículas finas que pudieran obstruir el sistema o alterar los resultados iniciales.

3. Acondicionamiento del recipiente: El contenedor fue preparado para simular un humedal de flujo superficial. Se dispusieron capas de sustrato en orden de granulometría creciente guata en el fondo, luego grava fina, grava gruesa y tezontle en la parte superior para permitir un flujo homogéneo y evitar la compactación. Posteriormente, se introdujeron las plantas en la zona de sustrato superficial y se estableció un flujo continuo de agua proveniente del Lago de Guadalupe.



Imagen 2. Estructura de bases para el recipiente



Imagen 3. Implementación de sustrato y plantas

4. Operación y monitoreo: El sistema se puso en marcha durante un periodo determinado, evaluando la calidad del agua en tres etapas: agua inicial (sin tratar), etapa intermedia y agua tratada. Posterior a esto se realizaron mediciones de parámetros físicos, es decir, turbidez, apariencia, sólidos, materia orgánica visible, así como el análisis de propiedades organolépticas.

RESULTADOS

El prototipo de mostro una reducción significativa de solidos suspendidos y una disminución consistente de la carga contaminante, evidenciando una mejora clara en la calidad de agua. Durante la operación del prototipo, se mantuvieron condiciones estables, con un desempeño sostenido en la remoción de contaminantes, lo que respalda la efectividad del sistema bajo las condiciones evaluadas.



Figura 4. Prototipo de humedal artificial de flujo superficial.

La implementación de sustrato y plantas en el sistema presento una mejora progresiva en la calidad del agua, evidenciada en parámetros físicos y apariencia.



Figura 5. Comparación de turbidez por etapas

CONCLUSIONES

El prototipo demuestra de manera contundente que los humedales artificiales son una solución efectiva, accesible y sostenible para la remediación del agua del lago de Guadalupe. La reducción significativa de solidos suspendidos evidencia su alta eficiencia en la mejora de la calidad de agua, validando su funcionamiento bajo condiciones reales.

Mas allá de su carácter piloto, su simplicidad operativa, bajo su consumo energético y variabilidad de implementación la posicionan como una alternativa estratégica frente a métodos convencionales

de tratamiento. sin mencionar que su escalamiento es factible y necesario ante la creciente presión antropogénica sobre los cuerpos de agua.

BIBLIOGRAFIA

1. Betanzo-Torres, E, A., García, L. F., Y Rodríguez, S. V. (2025). Especies vegetales en humedales artificiales para el tratamiento de efluentes acuícolas. Unarevision sistemática. Sustainability, 17(1), 1-25.
2. Silva, J. C., Mendoza, R. A., Y López, P. M. (2025). Evaluación de la eliminación de la turbidez en humedales de flujo superficial con Pistia stratiotes y sustrato de granulometría media. Water, 17(2), -15.
3. Yang. I. Chen, X., Y Wang, H. (2025). Materiales sustrato para la restauración ecológica en humedales artificiales: Clasificación y mecanismos de modificación química. Enviromental Research, 244, 1-12.

POTENCIAL SINÉRGICO DE QUITOSANO Y RIZOBACTERIAS PARA MEJORAR EL CRECIMIENTO DE LISIANTHUS

Tsujmejy Gómez-Navor, Libia Iris Trejo-Téllez, Juan José Almaraz-Suárez, Fernando Carlos Gómez-Merino, Marco Polo Carballo-Sánchez, Britany Guadalupe Muñoz-Muñoz

Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
gomez.tsujmey@colpos.mx

RESUMEN

En la floricultura, los bioestimulantes están surgiendo como una alternativa de producción novedosa y sostenible, impulsada por la adopción de prácticas agrícolas que buscan reducir el uso de fertilizantes químicos[1]. Actualmente se agrupan en dos categorías principales: microbianos (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrízicos) y no microbianos (ácidos húmicos, hidrolizados de proteínas, quitosano, compuestos inorgánicos y extractos de algas)[2]. Se conoce que la aplicación de bioestimulantes puede desencadenar diferentes respuestas fisiológicas y moleculares en la planta dando lugar a un aumento en el rendimiento y calidad. Por otro lado, el efecto combinado de dos o más bioestimulantes puede ser diferente al obtenido individualmente. Las combinaciones pueden dar lugar a interacciones aditivas, sinérgicas, a efectos mínimos o inclusive antagónicas[3]. En el presente estudio se evaluó el efecto de quitosano y rizobacterias en parámetros de crecimiento de lisianthus bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva de Steiner. El experimento se estableció mediante un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3×2×4. Los factores evaluados fueron: 1) niveles de solución Steiner (25%, 50% y 75%); 2) dosis de quitosano (0 y 50 mg L^{-1}); y 3) cepas de rizobacterias (*Achromobacter xylosoxidans* C56, *Arthrobacter pokkalii* JLB4, medio Luria-Bertani y agua destilada estéril). La inoculación de las rizobacterias se realizó en la base del tallo en tres momentos: al trasplante, a los 30 y a los 84 días después del trasplante (DDT). Se realizaron seis aplicaciones foliares de quitosano con una frecuencia quincenal, iniciando a los 7 DDT. A los 30 DDT se evaluó la altura y el diámetro del tallo. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y prueba de Tukey mediante el software SAS versión 9.4. La mayor altura de planta se obtuvo con la combinación de 50% de solución nutritiva Steiner, 50 mg de quitosano L^{-1} y la cepa JLB4. En contraste, la menor altura se observó en plantas tratados con 25% solución nutritiva Steiner, 0 mg de quitosano L^{-1} y agua destilada estéril. El diámetro de tallo no presentó diferencias significativas con ninguna de las vías de análisis (efectos principales ni interacciones). Se concluye que la aplicación combinada de bioestimulantes a base de quitosano y rizobacterias puede tener un efecto sinérgico en la altura de planta de lisianthus, permitiendo optimizar el crecimiento vegetativo incluso bajo niveles intermedios de fertilización (50% Steiner).

INTRODUCCIÓN

Las flores de corte poseen un alto valor ornamental y económico, ya que representan más del 40 % del mercado global florícola (Global Growth Insights, 2025). Dentro de esta categoría destaca el lisianthus [*Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinner] por su alta demanda en el mercado internacional. En esta especie la calidad comercial depende principalmente de la altura y diámetro de tallo (Gómez-Navor *et al*., 2026).

En la floricultura convencional, los altos estándares de calidad se logran a través del suministro intensivo de agroquímicos, prácticas asociadas con el deterioro de los suelos. El uso de bioestimulantes en la producción de flores de corte, está surgiendo como una alternativa de producción novedosa y sostenible (Ahmad *et al*., 2025; Torres-Flores *et al*., 2026), impulsada por la adopción de prácticas agrícolas que buscan reducir el uso de fertilizantes químicos. Además, los bioestimulantes empleados de manera adecuada tienen gran potencial para mejorar la calidad del cultivo, disminuir costos de producción y reducir los impactos ambientales (Chapin y Jones, 2025).

TEORÍA

Los bioestimulantes se definen por sus efectos en la función de las plantas, actúan como señales bioactivas que modulan las vías fisiológicas y mejoran la resiliencia de los cultivos (Du Jardin *et al*., 2025). Actualmente se agrupan en dos categorías principales: microbianos (rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrízicos) y no microbianos (ácidos húmicos, hidrolizados de proteínas, quitosano, compuestos inorgánicos y extractos de algas) (Arinaitwe *et al*., 2025).

Dentro de los bioestimulantes microbianos destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RBPCV), que son una clase de bacterias que habitan en la rizosfera y promueven el crecimiento de las plantas hospedantes (Ikiz *et al*., 2024). Existe una amplia gama de géneros de bacterias que promueven el crecimiento vegetal, estas pueden establecer una conexión simbiótica o asociativa con la planta, ofreciendo diferentes ventajas que van desde la movilización de nutrientes (como el fosfato y potasio), quelación de hierro, la fijación biológica de nitrógeno, hasta la producción de diferentes fitohormonas y enzimas (Kesavardhini *et al*., 2026). El empleo de RBPCV está tomando gran relevancia dentro del sector florícola, en crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) se reporta que su aplicación mejora la calidad de flores, además de que incrementa la acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio en la planta (Wang *et al*., 2024**).** En rosa (*Rosa hybrida* L.) cv. Black Prince, la inoculación con *Bacillus acidiceler*, *B*. *subtilis* y *B*. *pumilus* aumentó el diámetro de las flores hasta en 29% en comparación con el testigo (Araújo *et al*., 2020).

Por otra parte, el quitosano un polisacárido lineal, clasificado como un bioestimulante no microbiano y derivado principalmente de la desacetilación de la quitina. Su estructura está formada por unidades de N-acetil-D-glucosamina (N- GlcNAc) y D-glucosamina unidas mediante enlaces β-1,4 (Choudhary *et al*., 2026). Sus propiedades químicas y biológicas están determinadas principalmente por el grupo funcional amino, este es responsable de su carácter catiónico y de su capacidad de protonación en medios ácidos, así como su habilidad de formar enlaces de hidrógeno tanto intramoleculares como intermoleculares (Edo *et al*., 2025). En la agricultura, el quitosano se ha empleado para promover el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, en nardo (*Polianthes tuberosa* L.), la aplicación de quitosano a dosis de 60 mg L^{-1} en combinación con extractos de algas marinas promovió en el número de flósculos por espiga, la longitud de la espiga y del raquis, el peso fresco de la inflorescencia. Además, estimuló la acumulación foliar de N, P, K y clorofila total (Abd-El-Hady, 2020).

A pesar de la creciente evidencia de los beneficios de los bioestimulantes a base de quitosano y RBPCV, se sabe poco sobre sus efectos combinados ya que la mayoría de los estudios han investigado estos bioestimulantes por separado. Giordano *et al*. (2020) menciona que el efecto combinado de dos o más bioestimulantes puede ser diferente al obtenido individualmente, las combinaciones pueden dar lugar a interacciones aditivas, sinérgicas, a efectos mínimos o inclusive antagónicas. Por lo que el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto combinado de quitosano y rizobacterias en parámetros de crecimiento de lisianthus bajo diferentes concentraciones de solución nutritiva de Steiner.

PARTE EXPERIMENTAL

Condiciones de crecimiento y material vegetal

El experimento se desarrolló en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, bajo condiciones de malla sombra al 80%. Las plantas de lisianthus [*Eustoma grandiflorum* (Raf.) Shinners] cv. Mariachi Blue Double (Sakata) fueron trasplantadas a bolsas de polietileno negro con dimensiones de 30 x 30 cm.

Diseño experimental y descripción de los factores

El experimento se estableció mediante un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3×2×4. Los factores evaluados fueron: 1) niveles de solución Steiner (25, 50 y 75%); 2) dosis de quitosano (0 y 50 mg L^{-1}); y 3) cepas de rizobacterias (*Achromobacter xylosoxidans* C56, *Arthrobacter pokkalii* JLB4, medio Luria-Bertani y agua destilada estéril). La combinación de los factores dio lugar a 24 tratamientos con ocho repeticiones cada uno.

La solución nutritiva Steiner (1984) se suministró a través del sistema de riego por goteo. Las cepas de rizobacterias empleadas pertenecen a la colección microbiana del Laboratorio de Microbiología del Colegio de Postgraduados. Estas bacterias fueron multiplicadas en medio líquido Luria-Bertani y con el objetivo de aprovechar los metabolitos secundarios excretados por las bacterias durante su crecimiento, la inoculación se realizó junto con este medio. Los tres momentos clave de aplicación fueron: al momento del trasplante, a los 30 y a los 84 días después del trasplante (DDT). El quitosano se suministró vía foliar con una frecuencia quincenal, iniciando a los 7 DDT. Se empleó un quitosano comercial (Sigma-Aldrich, Steinheim, Alemania) de bajo peso molecular y 70% de grado de desacetilación.

Variables evaluadas

A los 30 DDT se midió la altura de la planta empleando una regla graduada, las mediciones se realizaron desde la base del tallo hasta el ápice terminal. El diámetro del tallo se determinó con un calibrador digital (Truper 14388; Shanghái, China).

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un análisis de varianza y prueba de comparación de medias por Tukey ($p \leq 0.05$), con el software estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute, 2009) versión 9.4.

RESULTADOS

La interacción de los tres factores de estudio tuvo efectos significativos en la altura de planta. En lo que respecta, a los efectos principales, la solución nutritiva Steiner y el quitosano fueron los factores que influyeron en la altura de planta, mientras que las cepas de rizobacterias no tuvieron un efecto significativo (datos no mostrados).

El suministro combinado 50 mg quitosano L^{-1} y la cepa *Arthrobacter pokkalii* JLB4, bajo un régimen de solución nutritiva Steiner al 50% mejoraron la altura de planta de lisianthus a los 30 DDT. Por el contrario, la menor altura de planta se observó en plantas tratadas con 25% de solución Steiner, sin quitosano y con agua destilada estéril y/o *Arthrobacter pokkalii* JLB4 (**Cuadro 1**). Resultados similares fueron reportados en maíz (*Zea mays* L.) donde la aplicación de quitosano extraído de *Callinectes amnicola* y *C. armatum* en combinación con *Pseudomona putida* mejoraron los parámetros de crecimiento incluidos la altura de planta, el diámetro de la corona y el área foliar (Agbodjato *et al*., 2021).

Cuadro 1. Efecto de la concentración de la solución nutritiva de Steiner, quitosano y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la altura de planta (cm) de lisianthus.

Steiner (%)	Quitosano (mg L^{-1})	Agua destilada	Medio LB	*Achromobacter xylosoxidans* C56	*Arthrobacter pokkalii* JLB4
25	0	4.28 ± 1.02 b	5.56 ± 3.29 ab	6.88 ± 3.25 ab	4.54 ± 2.74 b
25	50	4.75 ± 2.35 ab	6.31 ± 2.28 ab	5.13 ± 1.85 ab	8.04 ± 3.27 ab
50	0	5.91 ± 2.50 ab	5.94 ± 3.29 ab	6.60 ± 3.66 ab	6.60 ± 2.91 ab
50	50	7.96 ± 3.90 ab	5.50 ± 2.20 ab	7.69 ± 3.79 ab	10.91 ± 8.33 a
75	0	7.31 ± 4.16 ab	6.53 ± 2.42 ab	6.01 ± 2.82 ab	7.56 ± 3.61 ab
75	50	6.68 ± 2.92 ab	7.56 ± 3.82 ab	7.83 ± 2.45 ab	7.13 ± 3.00 ab

Medias ± DE con letra distinta indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Por otra parte, la altura de planta varió según la combinación entre la solución nutritiva Steiner y los bioestimulantes aplicados. En el caso de quitosano, los resultados más favorables se observaron en plantas tratadas con 50% de Steiner + 50 mg quitosano L^{-1}, con una media de 8.02 cm (datos no mostrados), mientas que las plantas tratadas con 25% de Steiner sin quitosano presentaron la menor

altura de planta (5.31 cm). De manera similar, la combinación de 50% de Steiner y *Arthrobacter pokkalii* JLB4 favoreció la altura de planta, con una media de 8.76 cm, en comparación con la combinación de 25% Steiner y agua destilada, que presento la menor respuesta.

El diámetro de tallo no presentó diferencias significativas en ninguno de los factores evaluados, ni en sus interacciones (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Efecto de la concentración de la solución nutritiva de Steiner, quitosano y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el diámetro de tallo (mm) de lisianthus.

Steiner (%)	Quitosano (mg L^{-1})	Agua destilada	Medio LB	*Achromobacter xylosoxidans* C56	*Arthrobacter pokkalii* JLB4
25	0	3.15 ± 1.35 a	2.98 ± 1.46 a	3.08 ± 1.12 a	3.25 ± 1.18 a
25	50	3.10 ± 1.10 a	2.42 ± 0.53 a	3.14 ± 1.17 a	2.75 ± 0.60 a
50	0	3.20 ± 1.28 a	3.96 ± 2.05 a	3.36 ± 1.32 a	3.47 ± 2.10 a
50	50	2.99 ± 1.49 a	2.85 ± 1.15 a	2.64 ± 0.81 a	3.23 ± 2.32 a
75	0	3.81 ± 1.70 a	2.88 ± 0.48 a	4.00 ± 1.94 a	3.23 ± 1.19 a
75	50	3.95 ± 1.60 a	2.95 ± 0.71 a	2.65 ± 0.15 a	3.25 ± 1.41 a

Medias ± DE con la misma letra indican que no existen diferencias estadísticas (Tukey, $P > 0.05$).

CONCLUSIONES

La aplicación combinada de quitosano y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal favoreció la altura de planta de lisianthus, particularmente cuando se utilizó la cepa *Arthrobacter pokkalii* JLB4 en combinación con 50 mg quitosano L^{-1} y una solución nutritiva Steiner al 50%. Estos resultados sugieren una interacción positiva entre ambos bioestimulantes, con potencial para optimizar el crecimiento vegetativo y contribuir a la reducción del uso de fertilizantes químicos en la producción de lisianthus.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Steiner, “The universal nutrient solution”, in *6th International Congress on Soilless Culture*, (Wageningen, The Netherlands,1984), pp. 633-650.
2. Ikiz, H. Y. Dasgan, N. Gruda, “Utilizing the power of plant growth promoting rhizobacteria on reducing mineral fertilizer, improved yield, and nutritional quality of Batavia lettuce in a floating culture”, Sci. Rep., Vol. 14, 1, 1616, 2024.
3. G. I. Edo, W. Ndudi, A. B. M. Ali, E. Yousif, K. Zainulabdeen, P. O. Akpoghelie, E. F. Isoje, U. A. Igbuku, O. A. Omoregie, E. E. Onoja, D. A. Al-Mashhadani, A. A. Alamiery, “Chitosan: An overview of its properties, solubility, functional technologies, food and health applications”, Carbohydr. Res., Vol. 550, 109409, 2025.
4. Global Growth Insights 2025, “Floriculture market size, share, growth, and industry analysis, by types (cut flowers, bedding plants, potted plants, other), by applications covered (personal use, gift, conference & activities, other), regional insights and forecast to 2033”, Global Growth Insights. https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/floriculture-market-107098 (Recuperado: mayo 2026).
5. Ahmad, H. Ashfaq, J. M. Dole, T. Hussain, H. Safdar, A. Jabeen, “Biostimulants improve growth, yield and quality of *Eustoma grandiflorum* L. and *Matthiola incana* L.”, Ornam. Hortic., Vol. 31, e312816, 2025.
6. K. Kesavardhini, I. A. M. Essa, A. K. Nayak, H. A. Gharban, K. Gayathri, P. Saranraj, “Harnessing plant growth promoting rhizobacteria to bolster drought tolerance in plants”, Discov. Appl. Sci., Vol. 8, 89, 2026.

7. L. J. Chapin, M. L. Jones, “Microbial biostimulants promote the growth of greenhouse pansies at low fertilizer rates but not under optimal fertility”, HortTechnology, Vol. 35, 2, 2025, pp. 821-823.
8. M. Giordano, C. El-Nakhel, G. Caruso, E. Cozzolino, S. De Pascale, M.C. Kyriacou, G. Colla, Y. Rouphael, “Stand-alone and combinatorial effects of plant-based biostimulants on the production and leaf quality of perennial wall rocket”, Plants, Vol. 9, 922, 2020.
9. N. A. Agbodjato, T. Mikpon, O. O Babalola, D. Dah-Nouvlessounon, O. Amogou, H. Lehmane, M. Y. Adoko, A. Adjanohoun, L. Baba-Moussa, “Use of plant growth promoting rhizobacteria in combination with chitosan on maize crop: Promising prospects for sustainable, environmentally friendly agriculture and against abiotic stress”, Agronomy, Vol. 11, 2205, 2021.
10. N. A. F. Araújo, R. M. Brandão, B.M. Barguil, M. G. Cardoso, M. Pasqual, R. A. L. S. Rezende, M. M. A Pereira, V. H. T Buttrós, J. Dória, “Plant growth-promoting bacteria improve growth and modify essential oil in rose (*Rosa hybrida L.*) cv. Black Prince”, Front. Sustain. Food Syst., Vol. 4, 606827, 2020.
11. N. I. Torres-Flores, F. C. Gómez-Merino, Y. L. Fernández-Pavía, L. I. Trejo-Téllez, “Uso de bioestimulantes para mejorar la calidad de las ornamentales”, Agro-Divulgación, Vol. 6,1, 2026, pp. 17-20.
12. P. Du Jardin, P. H. Brown, T. M. DeJong, F. Cassán, A. Ferrante, V.Fotopoulos, G. A. Manganaris, P. Carillo, “Unlocking the black box of plant biostimulants”, Sci. Hortic., Vol. 350, 114281, 2025.
13. SAS Institute, “Base SAS 9.4 Procedures Guide: Statistical Procedures, version 9.4”, SAS Institute, Cary, NC, USA, 2009.
14. T. Gómez-Navor, F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, “Floricultura sustentable y resiliente: uso de quitosano y rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal en la producción de lisianthus”, Agro-Divulgación, Vol. 6, 1, 2026, pp. 29-32.
15. U. Arinaitwe, D. N. Yabwalo, A. Hangamaisho, “Unlocking the potential of biostimulants: A review of classification, mode of action, formulations, efficacy, mechanisms, and recommendations for sustainable intensification”, Int. J. Plant Biol., Vol. 16, 122, 2025.
16. W. M. F. Abd-El-Hady, “Response of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) plants to chitosan and seaweed foliar application”, Sci. J. Flowers Ornam. Plants., Vol. 7, 2020, pp. 153-161.
17. Y. Choudhary, N. Rani, M. Boora, S. Devi, A. Kumar, S. Kumari, S. Grewal, “Chitosan nanoparticles and their conjugates in drought stress management: A cutting-edge strategy for crop resilience”, Plant Nano Biol., Vol. 15, 100251, 2026.
18. Y. Wang, X. Fang, Y. Zhou, Y. Liao, Z. Zhang, B. Deng, Z. Guan, S. Chen, W. Fang, F. Chen, S. Zhao, “Transcriptome analysis of growth and quality response of chrysanthemum to co-inoculation with *Bacillus velezensis* and *Pseudomonas aeruginosa*”, Sci. Hortic., Vol. 326, 112722, 2024.

RESPUESTA DEL AGUACATE 'VELVICK' A LA APLICACIÓN DE SILICIO PARA SU ESTABLECIMIENTO *IN VITRO*

Alma Delia Abarca-Cervantes[1]; Fernando Carlos Gómez-Merino[1]; Libia Iris Trejo-Téllez[1]; Gregorio Arellano-Ostoa[1]; Alejandro F. Barrientos-Priego[2]; Isaí Monroy-González[1]; Imelda Rueda-López[1]

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. [2]Universidad Autónoma Chapingo.
abarca.alma@colpos.mx

RESUMEN

La propagación *in vitro* de aguacate (*Persea americana*) es una opción más eficiente en tiempo en comparación con otras técnicas de propagación asexual. Sin embargo, existen complicaciones en la etapa de establecimiento por contaminación y necrosis del tejido, lo cual puede ser disminuido con aplicaciones de silicio (Si). En este estudio se estableció un experimento factorial 2 x 2 en condiciones *in vitro*, para probar el efecto de dos formas de aplicación de Si en indicadores de sobrevivencia, presencie de bacterias y fenolización de explantes. El factor 1 fue la aplicación de Si por inmersión en la predesinfestación (0 y 0.8 mM de Si), y el factor 2 el tratamiento con Si en el medio de cultivo (0 y 0.8 mM de Si), con 20 repeticiones. Se utilizó solución Steiner al 10 % como medio de cultivo con 1 mg benciladenina L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenoacético L^{-1}, 15 g sacarosa L^{-1}, 5 g agar L^{-1} y vitaminas a pH 5.7. Se adicionó 0.8 mM Si al medio en los tratamientos correspondientes. En el protocolo de desinfestación, explantes de aguacate var. 'Velvick' (3 cm de longitud) se enjuagaron por 30 min en agua corriente. Luego, en campana de flujo laminar, se aplicaron los tratamientos de 0 y 0.8 mM Si por inmersión por 15 min. Después, por inmersión en una mezcla de fungicidas (0.125 g Benomilo L^{-1}, 0.25 g Manzeb® 80WP L^{-1} y 0.25 g Captán 50WP L^{-1}) por 3 min; en bactericida (4 mL Kasumin® L^{-1} + 1.2 g Fungimycin® 100 L^{-1}) por 3 min y en etanol al 70 % por 30 s y enjuagues con agua destilada estéril durante 2 min entre etapas y al final. Se sembró un explante con dos yemas por tubo con medio de cultivo con 0 y 0.8 mM Si, según su tratamiento. Se mantuvo el material sembrado en un cuarto de crecimiento a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad durante 8 d. La adición de 0.8 mM Si al medio y en conjunto en la desinfestación, mejora el porcentaje de sobrevivencia en 10 y 15 %, respectivamente, con relación al testigo. La sola aplicación de 0.8 mM Si en la desinfestación reduce 40 % la sobrevivencia e incrementa 55 % la incidencia de bacteria + necrosis, respecto al testigo. Asimismo, la aplicación de 0.8 mM Si en el medio y en la desinfestación disminuye en 10 y 25 % la necrosis del tejido, respectivamente. Esto es importante porque permite obtener explantes sanos para continuar con la etapa de elongación y enraizamiento *in vitro*. Se concluye que la adición de 0.8 mM Si al medio y en la desinfestación mejora la sobrevivencia y reduce la necrosis de explantes de aguacate var. 'Velvick'.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista nutricional, el fruto del aguacate (*Persea americana*) destaca por su contenido de fibra, proteínas, aceites, potasio y vitaminas como C, E y B6 (Dreher y Davenport, 2013; Chávez-García *et al*., 2024). Estas propiedades se asocian con efectos benéficos para la salud humana como, reducción del colesterol y de los triglicéridos (Stephen y Radhakrishnan, 2022), combate a células cancerígenas, y mejoramiento de la piel, por lo que, además de su relevancia alimentaria, también cobra importancia en la industria farmacéutica (Araújo *et al*., 2018). En los últimos años el aguacate ha tenido un incremento importante tanto en la oferta como en la demanda. Los principales países productores son México, Colombia, Perú, República Dominicana y Kenia, que concentraron el 63.3 % de la producción mundial en 2022 (FIRA, 2024). Estados Unidos, un consumidor importante a nivel mundial en la última década ha incrementado su consumo anual prácticamente al doble, y abastece su consumo con aguacate mexicano en casi 90 % (Alberti *et al*., 2017).

Debido a esta demanda internacional, producir aguacate de alta calidad para su exportación es fundamental. Sin embargo, una característica de la planta es la polinización cruzada, que incrementa

la variabilidad genética, y a su vez, la variabilidad en la producción (Alberti *et al*., 2017). La primera metodología exitosa se basa en la etiolación del material vegetal para el enraizamiento y se realiza una doble injertación (Frolich y Platt, 1972). Actualmente, las técnicas más utilizadas de propagación clonal son modificaciones a dicho método, como el método de Allesbeste o de Brokaw, es una técnica implementada en países como Sudáfrica, Australia y California. Dentro de sus principales desventajas se encuentra la larga duración del proceso (18 meses), su complejidad y elevado costo (Alberti *et al*., 2017). La planta clonal garantiza homogeneidad genética en la huerta, uniformidad en la tolerancia a patógenos y condiciones de estrés abiótico, así como, uniformidad en la calidad del fruto generando mayores rendimientos (Alberti *et al*., 2017; Whiley, 2024). Ante la necesidad de encontrar un método eficiente y escalable masivamente, destaca el cultivo *in vitro*, como una alternativa más eficiente para la propagación clonal de portainjertos de aguacate. Sin embargo, existen complicaciones por en la etapa de establecimiento por contaminación y necrosis del tejido, así como, diferencias entre los portainjertos de aguacate que se traducen en diferencias en la capacidad de enraizamiento y aclimatación (Manokari *et al*., 2023). Por ello, resulta importante mejorar el protocolo de establecimiento por portainjerto. Una opción es la aplicación de silicio (Si), pues se ha documentado que este elemento benéfico puede mitigar el estrés biótico en plantas tanto en campo como en cultivo *in vitro* (Kumar *et al*., 2025).

El objetivo del trabajo fue evaluar la forma de aplicar Si durante la propagación *in vitro* del portainjerto de aguacate var. 'Velvick', en indicadores de sobrevivencia y presencia de necrosis en explantes.

TEORÍA

La propagación *in vitro* de aguacate resulta un reto al ser una especie de difícil enraizamiento, y en el caso de la variedad 'Velvick' es considerada como un portainjerto de muy difícil enraizamiento en comparación a otros (Hiti-Bandaralage *et al*., 2022). Previo a las etapas de multiplicación y enraizamiento es necesario un establecimiento exitoso, el cual es afectado negativamente por la contaminación por hongos, bacterias y la necrosis del tejido. Los efectos del Si ante condiciones de estrés biótico y abiótico pueden ser una alternativa para mejorar los protocolos de establecimiento. En cultivo *in vitro*, la aplicación de Si reduce la incidencia de hongos (Sun *et al*., 2022). Además, durante el establecimiento y el corte de los explantes, sobre todo de tejidos leñosos, puede darse una excesiva liberación de fenoles, lo que provoca una oxidación fenólica que oscurece el medio de cultivo (Pequeño-Granado *et al*., 2015). Las aplicaciones de Si ayudan a estimular el sistema antioxidante de las plantas, lo que podría mitigar la oxidación en explantes que llevan a la necrosis.

PARTE EXPERIMENTAL

Se obtuvo material vegetal (varetas de 20 cm) de brotes jóvenes de árboles de aguacate var. 'Velvick' establecidos en macetas de 50 L en San Miguel, Tlaixpan, Texcoco, Estado de México (19.511º N, -98.814º O, 2417 m de altitud).

El establecimiento *in vitro* de explantes se realizó en el Laboratorio de Biotecnología y Frutales del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado en Montecillo, municipio de Texcoco, Estado de México (19.461º N, -98.910º O, 2240 m de altitud). Se implementó un experimento factorial 2 × 2; el factor Si por inmersión en la predesinfestación (0 y 0.8 mM de Si) y el factor Si en el medio de cultivo (0 y 0.8 mM de Si) con 20 repeticiones.

Como medio basal se utilizó solución Steiner al 10 % con 1 mg benciladenina L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenoacético L^{-1}, 15 g sacarosa L^{-1}, 5 g agar L^{-1} y vitaminas, ajustando el valor de pH a 5.7. Se adicionó 0.8 mM Si al medio en los tratamientos correspondientes.

En el protocolo de desinfestación, a partir de las varetas, transportadas en frío al laboratorio, se obtuvieron explantes de aguacate ˙Velvick˙ de 3 cm de longitud. Se enjuagaron por 30 min en agua corriente. Luego, en campana de flujo laminar, se aplicaron los tratamientos de 0 y 0.8 mM Si por inmersión por 15 min. Después, por inmersión en una mezcla de fungicidas (0.125 g L^{-1} Benomilo,

0.25 g L^{-1} Manzeb® 80W y 0.25 g L^{-1} Captán 50WP) por 3 min; en bactericida (4 mL L^{-1} Kasumin® + 1.2 g L^{-1} Fungimycin® 100) por 3 min y en etanol al 70 % por 30 s y enjuagues con agua destilada estéril durante 2 min entre etapas y al final de los procedimientos. Se sembró un explante con dos yemas por tubo con medio de cultivo con 0 y 0.8 mM Si, según su tratamiento. Se mantuvo el material sembrado en un cuarto de crecimiento a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad durante 8 d.

RESULTADOS

Al observar los explantes fue posible identificar tejido oscurecido y medio de cultivo ligeramente menos traslucido en los dos tratamientos donde no se agregó Si al medio de cultivo (**Figura 1A**).
La adición de 0.8 mM Si al medio y en conjunto en la desinfestación, mejoró el porcentaje de sobrevivencia en 10 y 15 %, respectivamente, con relación al testigo. Por el contrario, la aplicación de 0.8 mM Si en la desinfestación redujo la sobrevivencia en 40 % e incrementó la incidencia de bacterias + necrosis en 55 %, respecto al testigo. La aplicación de 0.8 mM Si en el medio y en la desinfestación disminuyó en 10 y 25 % la necrosis del tejido, respectivamente (**Figura 1B**).
En el cultivo *in vitro* de tejidos de plantas leñosas, las heridas en manejo de los explantes durante el proceso de desinfestación o incluso el corte de los explantes en el establecimiento, puede dañar el tejido y provocar la liberación de fenoles y oscurecer el medio de cultivo y el tejido (Liu *et al*., 2024).



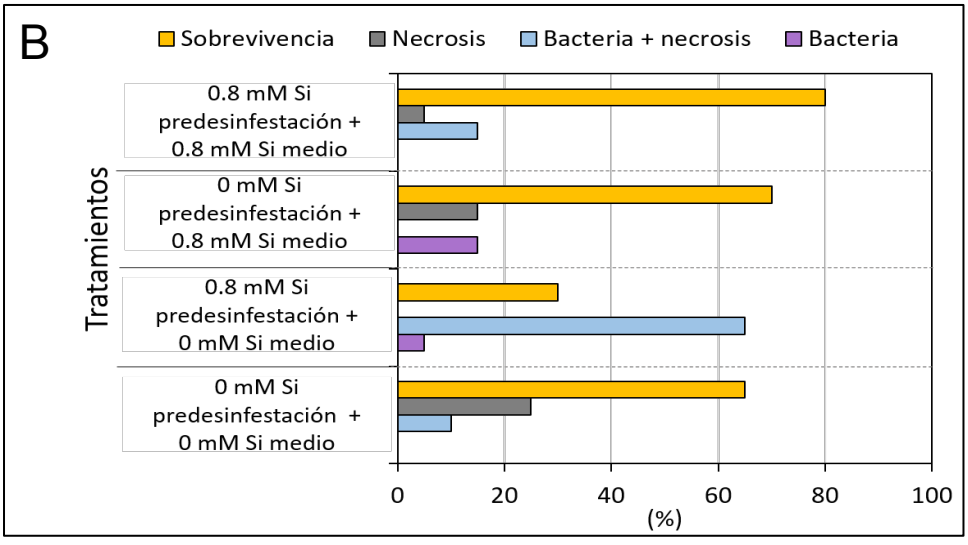


Figura 1. Efecto de la forma de aplicación de silicio (Si) en medio de cultivo y en la pre-desinfestación *in vitro* de aguacate (*Persea americana*) var. 'Velvick' a los 8 d. A: Representación de los tratamientos. B: Efecto de Si en la contaminación y oxidación.

Este oscurecimiento se asocia a la actividad de la enzima polifenol oxidasa, que oxida compuestos fenólicos, y aumenta su actividad cuando la planta ha sufrido un daño o lesión (Pequeño-Granado *et al*., 2015).

La enzima polifenol oxidasa, oxida compuestos fenólicos, y derivado de ello se forman las quinonas, compuestos que se polimerizan y dan el color marrón (Moon *et al*., 2020). El Si puede participar en la activación del sistema antioxidante de la planta, tanto enzimático como no enzimático (Álvarez *et al*., 2023). Aunque también puede inducir la actividad de polifenol oxidasa, podría interactuar con los fenoles, reduciendo el sustrato de polifenol oxidasa (Coskun *et al*., 2019; Fleck *et al*., 2011). Se ha comprobado que el aguacate produce ácido cafeico (Bangar *et al*., 2022), el cual es uno de los precursores de la lignina y se ha observado que el Si forma complejos o precipitados (Coskun *et al*., 2019; Liu *et al*., 2018). Por lo tanto, podría haber una especie de retención de los fenoles (sustratos de la enzima polifenol oxidasa) que inhiba su actividad.

CONCLUSIONES

Con esto se concluye que la adición de 0.8 mM Si al medio y en la desinfestación mejora la sobrevivencia y reduce la necrosis de explantes de aguacate var. 'Velvick'. Este hallazgo es importante porque permite obtener explantes sanos para continuar con las etapas de multiplicación, elongación y enraizamiento *in vitro*.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, D. Oliveros, Y. C. Ávila, A. C. P. Sabogal, W. Murillo, J. E. Joli, M. B. Bermúdez-Cardona, N. Guarnizo, “Resistance Induction with silicon in Hass avocado plants inoculated with *Phytophthora cinnamomi* Rands”, Plant Signal. Behav., Vol. 18, 2023, 2178362.
2. Kumar, A. Choudhary, H. Kaur, K. Singh, S. Guha, D. R. Choudhary, A. Sonkar, S. Mehta, A. Husen, “Exploring the Role of silicon in enhancing sustainable plant growth, defense system, environmental stress mitigation and management”, Discov. Appl. Sci., Vol. 7, 406, 2025.
3. T. Fleck, T. Nye, C. Repenning, F. Stahl, M. Zahn, M. K. Schenk, “Silicon enhances suberization and lignification in roots of rice (*Oryza sativa*)”, J. Exp. Bot., Vol. 62, 2011, pp. 2001-2011.
4. Whiley, “Propagation”, in *The Avocado; Botany, Production and Uses* (CAB International Digital Library, 2024), Chapter 9, pp. 264-318. https://www.perlego.com/book/4892120/the-avocado-botany-production-and-uses-pdf
5. Liu, H. Fan, J. Zhang, J. Wu, M. Zhou, F. Cao, G. Tao, X. Zhou, “Combating browning: mechanisms and management strategies in *in vitro* culture of economic woody plants. For. Res., Vol. 26, 2024, e032.
6. Coskun, R. Deshmukh, H. Sonah, J. G. Menzies, O. Reynolds, J. F. Ma, H.J. Kronzucker, R. R. Bélanger, “The controversies of silicon's role in plant biology”, New Phytol, Vol. 221, 2019, pp. 67-85.
7. F. Alberti, A. B. Do, D. Rodrigues, T. Cantuarias-Avilés, C. Fassio, “Avances en la propagación del aguacate”, Rev. Bras. Frutic., Vol. 40, 6, 2017, e-782.
8. FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura), “Panorama Agroalimentario. Aguacate, 2024”. https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=123406 [Recuperado: enero de 2025].
9. F. Frolich, R. G. Platt, “Use of the etiolation technique in rooting avocado cuttings”, California Avocado Society Yearbook, New York Vol. 55, 1972, pp. 97-109. http://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_55_1971/CAS_1971-72_PG_097-109.pdf

10. Pequeño-Granado, G. Martínez-Ávila, V. Aguirre-Arzola, L. Iracheta-Donjuan, V. Mojica-Marín, G. Rodríguez-Pérez, M. Ojeda-Zacarías, “Efecto del NaClO sobre la actividad de polifenol oxidasa en explantes de hoja y peciolo de dos genotipos de *Jatropha curcas* L.”, Bioagro, Vol. 27, 3, 2015, pp. 167-172.
11. K. M. Moon, E. B. Kwon, B. Lee, C. Y. Kim, “Recent trends in controlling the enzymatic browning of fruit and vegetable products”, Molecules Vol. 25, 12, 2020, 2754.
12. J. C. A. Hiti-Bandaralage, A. Hayward, N. Mitter, “Structural disparity of avocado rootstocks *in vitro* for rooting and acclimation success”, Int. J. Plant Biol., Vol. 13, 4, 2022, pp. 426-442.
13. J. Stephen, M. Radhakrishnan, “Avocado (*Persea americana* Mill.) fruit: Nutritional value, handling and processing techniques, and health benefits”, J. Food Process. Preserv., Vol. 46, 12, 2022, pp. 1-14.
14. M. L. Dreher, A. J. Davenport, “Hass avocado composition and potential health effects”, Crit. Rev. Food Sci. Nutr., Vol. 53, 7, 2013, pp. 738-750.
15. M. Manokari, R. M. Cokul, A. Dey, M. Faisal, A. A. Alatar, N. Joshee, M. S. Shekhawat, “Structural alterations of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf leaves and roots caused by silicon nanoparticles during *in vitro* propagation”, Ind. Crops. Prod., Vol. 197, 2023, 116648.
16. Q. Liu, L. Luo, L. Zheng, “Lignins: Biosynthesis and biological functions in plants”, Int. J. Mol. Sci., Vol. 19, 2, 2018, 335.
17. R. G. Araújo, R. M. Rodriguez-Jasso, H. A. Ruiz, M. M. E. Pintado, C. N. Aguilar, “Avocado by-products: Nutritional and functional properties”, Trends Food Sci. Technol, Vol. 80, 2018, pp. 51-60.
18. S. N. Chávez-García, P. G. de León-García, L. G. Campos-Múzquiz, A. C. Flores-Gallegos, R. G. Castillo-Godina, J. A. Ascacio-Valdes, C. M. Lopez-Badillo, R. Rodríguez-Herrera, “Nutrimental, physicochemical and sensory properties of creole avocado fruits from Parras de la Fuente, Coahuila”, Ecosist. Recur. Agropec., Vol. 11, 2, 2024, e3838.
19. S. P. Bangar, K. Dunno, S. B. Dhull, A. S. Kumar, S. Changan, S. Maqsood, A. R. Vasile, “Avocado seed discoveries: chemical composition, biological properties, and industrial food applications”, Food Chem., Vol. 16, 2022, 100507.
20. S. Sun, Z. Yang, Z. Song, N. Wang, N. Guo, J. Niu, A. Liu, B. Bai, G. J. Ahammed, S. Chen, “Silicon enhances plant resistance to *Fusarium* wilt by promoting antioxidant potential and photosynthetic capacity in cucumber (*Cucumis sativus* L.)”, Front. Plant Sci., 13, 2022, 1011859.

ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD ANTIBACTERIANA DE EXTRACTOS CRUDOS DE *Lentinula Edodes*

Erandi Natalia Hernandez Tarango, Leticia Aguilar Doroteo y Angélica Cruz Solorio

Instituto Politécnico Nacional- UPIBI.
ehernandezt2001@alumno.ipn.mx, laguilard@ipn.mx.

RESUMEN

Dentro del reino Fungi, el género *Lentinula* es renombrado por su capacidad descomponedora; sin embargo, *Lentinula edodes*, conocido comúnmente como shiitake, sobresale tanto por su valor nutricional, así como los metabolitos que produce. Estas propiedades lo convierten en un organismo de gran interés científico y un candidato prometedor en la investigación frente a la resistencia antibacteriana. En el presente estudio, se determinó el perfil micoquímico y la actividad antibacteriana de tres extractos crudos a partir del hongo seco y molido *Lentinula edodes* mediante maceración, con solventes de distintas polaridades (metanol, acetato de etilo y hexano). El perfil micoquímico evidenció la presencia de carbohidratos, proteínas, alcaloides, sesquiterpenlactonas y glicósidos en los tres extractos analizados. De la misma manera, se detectó reacción positiva para quinonas en los extractos de acetato de etilo y metanólico, mientras que en este último también se identificaron cumarinas, metabolitos que han demostrado actividad antimicrobiana. Se determinó la actividad antimicrobiana en dos cepas Gram positivas (*Staphylococcus aureus* y *Bacillus subtilis*) y tres cepas Gram negativas (*Escherichia coli, Yersinia enterocolitica* y *Pseudomonas aeruginosa*). El análisis cualitativo se realizó mediante el método Kirby-Baüer presentando un intervalo de halos de inhibición de 6.2 a 20.43 mm, indicando una alta sensibilidad en las cepas Gram positivas. Consecuente a esto, se determinó la concentración mínima inhibitoria (CMI) de las pruebas positivas, el extracto de acetato de etilo presentó una CMI de 0.75 mg/ml contra *Bacillus subtilis*, en cambio para el extracto hexánico fue de 12 mg/mL contra *Pseudomonas aeruginosa*. Los extractos crudos de *Lentinula edodes* mostraron actividad antibacteriana frente a diversos microorganismos patógenos, lo que sugiere la presencia de compuestos bioactivos con potencial terapéutico. Estos hallazgos respaldan su contribución al desarrollo de alternativas frente a la creciente resistencia antibacteriana.

INTRODUCCIÓN

El reino *Fungi* está presente en todo el planeta, los hongos son piezas clave en el equilibrio de los ecosistemas gracias a su papel fundamental en la degradación de la materia orgánica; sin embargo, su relevancia va mucho más allá de sus funciones descomponedoras, debido a que poseen numerosas propiedades que trascienden su papel biológico (Rúa-Giraldo, 2023).

Los hongos comestibles han sido utilizados por el ser humano desde poblaciones antiguas. Actualmente, son reconocidos como alimentos funcionales, además de aportar nutrientes básicos en la dieta humana, contribuyen a la salud gracias a la acción de sus diferentes compuestos bioactivos (Mayett y Martínez-Carrera, 2019).

El hongo *Lentinula edodes*, también conocido como shiitake, es originario de Asia el cuál se ha popularizado en la industria alimentaria debido a sus múltiples nutrientes y su sabor amaderado tan característico; sin embargo, diversos estudios han demostrado que es un ejemplar con muchos más atributos que se podrían usar para fines biológicos, como lo son sus propiedades antioxidantes, antifúngicas, antiinflamatorias o antimicrobianas, todo esto gracias a sus metabolitos secundarios (Fernández et al., 2020).

Si bien durante mucho tiempo los hongos fueron estigmatizados como venenosos, actualmente se sabe que una parte de este reino no solo es comestible, sino que también aporta grandes beneficios

al ser humano. Estos metabolitos tales como alcaloides, terpenos o diferentes polisacáridos han demostrado en otros hongos estudiados tener actividad antimicrobiana (García et al., 2021).

La resistencia antimicrobiana es la capacidad, ya sea natural o adquirida de los microorganismos para sobrevivir a los medicamentos diseñados contra ellos, estos mecanismos dificultan no solo el tratamiento de las enfermedades si no que reduce las opciones terapéuticas disponibles.

La resistencia bacteriana ha generado una alerta mundial tan significativa que organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) la reconocen como una crisis actual. No solo afecta la salud de individuos, sino que también compromete la salud pública, incrementa la mortalidad y provoca graves repercusiones económicas y sociales (Giono-Cerezo et al., 2020).

TEORÍA

Frente a este panorama, surgen tres problemáticas principales: La creciente resistencia a los antibacterianos tradicionales, la necesidad de alternativas terapéuticas naturales y accesibles, así como enfrentar la limitada información disponible sobre los metabolitos secundarios del shiitake y su posible actividad antibacteriana.
Los objetivos del presente estudio fueron obtener extractos crudos de diferente polaridad de *Lentinula edodes*, identificar mediante pruebas micoquímicas metabolitos secundarios presentes en los mismos y determinar la actividad antibacteriana de los extractos crudos de *Lentinula edodes.*

Con este enfoque, el propósito de este proyecto fue ampliar el conocimiento sobre las propiedades antibacterianas del hongo *Lentinula edodes*, con el fin de su posterior aplicación en nuevos tratamientos contra infecciones bacterianas.

PARTE EXPERIMENTAL

El material biológico utilizado para la preparación de los extractos fue el hongo comestible shiitake *(Lentinula edodes*) adquirido en charolas de la marca Monte Blanco; mientras que para los ensayos antibacterianos se utilizaron dos cepas Gram positivas (*Staphylococcus aureus y Bacillus subtilis*) y tres cepas Gram negativas (*Escherichia coli, Yersinia enterocolitica y Pseudomonas aeruginosa*) las cuales se cultivaron en agar nutritivo BD DBioxon y se mantuvieron a 4°C para su uso posterior.
La parte experimental se dividió en cuatro fases diferentes para lograr los objetivos establecidos: Preparación de los extractos, pruebas micoquímicas, pruebas antibacterianas cualitativas y pruebas antibacterianas cuantitativas.

Se pesó cada charola de hongo fresco y se fragmentaron los hongos para favorecer el secado, que se llevó a cabo en charolas de aluminio y dejándose a temperatura ambiente durante 4 días, al cabo de este tiempo se pulverizó el hongo seco con la ayuda de una licuadora marca Oster y se almacenó en una bolsa plástica en el desecador.

Para la preparación de los extractos se utilizaron tres extractos a diferente polaridad (metanol, acetato de etilo y hexano) con el método de maceración descrito por Corzo (2012) donde para cada extracto se pesaron 30g de polvo de hongo seco previamente preparado los cuales se añadieron en un frasco ámbar de un litro de capacidad con el solvente correspondiente: En el primer frasco se colocaron 200 mL de metanol, en el segundo 200mL de Acetato de etilo y en el tercero la misma cantidad de hexano, adicionando piedras tezontle a la maceración para evitar que se sedimentara.
Los tres frascos quedaron en agitación durante 10 días, esto para obtener los extractos de manera simultánea, después de este tiempo se filtró el líquido por separado de cada uno de los frascos y se recuperó para colocarlo en un matraz globo y llevarlo al rotavapor marca Bûchi a la temperatura de ebullición del solvente (64.7°C para metanol, 77°C para acetato de etilo y 69°C para hexano) para así eliminar la mayor cantidad del solvente. Cuando el extracto se redujo en volumen se colocaron en viales de vidrio limpios, estériles y previamente pesados donde después de la evaporación total de los solventes se determinó el rendimiento.

Para la identificación de metabolitos se realizó un perfil micoquímico mediante pruebas cualitativas según los procedimientos descritos en el Manual de productos naturales de la UPIBI-IPN, en el cual se demostraba la presencia o ausencia de los metabolitos según el cambio a la apariencia positiva del reactivo utilizado.

Una vez identificados los metabolitos, se realizaron las pruebas cualitativas antibacterianas con el método Kirby-Baüer (Hudzicki, 2009). Se diluyeron los extractos (200 mg de cada uno) en 1000 µL de solvente correspondiente en viales separados, para después de homogenizar y sobre cajas petri estériles en filas acomodadas de sensidiscos estériles poder agregar 40 µL de solución en rondas de 10 µL a cada uno, para obtener una concentración final de 8 mg/mL en cada sensidisco.

Se repite el procedimiento con los tres extractos y se realizan los controles utilizando los solventes como control negativo y sensidiscos con una concentración de 0.15 mg/mL de cloranfenicol como control positivo.

En cuanto a las bacterias, se diluyen en solución salina y se homogenizan hasta quedar a una concentración de 1.5×10^9 UFC/mL, para que con esta misma solución se realice el tapete bacteriano con un hisopo estéril sobre la superficie de una placa de agar Mueller-Hinton previamente etiquetada. Se repite el procedimiento con las bacterias restantes realizando la inoculación en dos placas por prueba, cada prueba se realizó por triplicado.

Una vez inoculadas se colocan los sensidiscos conforme el diagrama (Figura 1) y se llevaron a incubar por 24 horas a 36°C, para después de este tiempo medir el halo de inhibición bajo luz indirecta, con un valor mínimo de 6 mm.

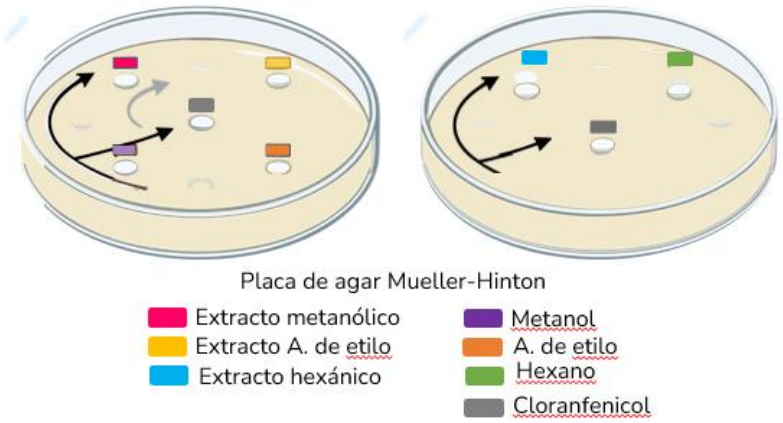


Figura 1. Acomodo de los sensidiscos.

Una vez realizada la prueba cualitativa, se utilizan las bacterias sensibles a los extractos para hacer la prueba cuantitativa. Para esta prueba se determina la Concentración Mínima Inhibitoria (CMI) con el método de dilución en agar (Montes-de-Oca-Márquez et al., 2017).

Primero, las bacterias se resiembran con anterioridad (24 horas antes) en caldo Mueller Hinton marca DB Dixon para después inocular en solución salina al 0.9% para ajustar a una concentración de $1x10^8$.

Para preparar las disoluciones se pesaron 20 mg de extracto y se diluyó en 500mL del solvente correspondiente para obtener una concentración inicial de 0.4 mg/mL; a partir de esta disolución y utilizando caldo Mueller Hinton se evaluaron ocho concentraciones diferentes (0.062, 0.125, 0.250, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 y 2 mg/mL).

Para la prueba de CMI, se colocaron las ocho concentraciones distintas de los extractos en los pozos de una placa ELISA, siguiendo el esquema de la Figura 2. En cada pozo se añadieron 50 µL de la solución del extracto y 50 µL de la suspensión bacteriana correspondiente. Posteriormente, las placas se incubaron a 36 °C durante 24 horas.

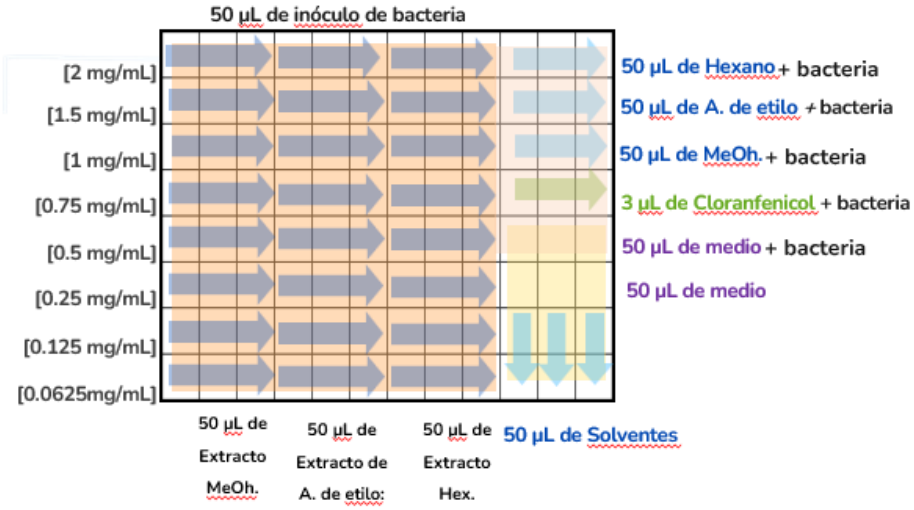


Figura 2. Esquema de placa ELISA para pruebas de CMI.

Después de incubar, se agregan 50 µL de Violeta de Tetrazolium al 0.08% a todas las celdas, se lleva a incubar una última hora para después registrar los resultados. La CMI se determina en los pozos donde no se observa crecimiento bacteriano. Esto puede identificarse por el cambio de color: una tonalidad violeta indica presencia de crecimiento, mientras que la ausencia de dicha coloración confirma que no hubo crecimiento bacteriano.

Se repitió la prueba a concentraciones mayores (0.75 a 12 mg/mL) para las bacterias que presentaron resistencia en las primeras disoluciones, siguiendo el mismo procedimiento.

RESULTADOS

De los tres extractos obtenidos a partir de 30 g de polvo de hongo seco, el metanólico presentó el mayor rendimiento con 7.26% (2.18 g), seguido por el de acetato de etilo con 0.83% (0.25 g), mientras que el hexánico mostró el valor más bajo con 0.28% (0.086 g).

Los resultados de las pruebas micoquímicas se presentan en la tabla 1: registrando presencia (+) cuando el cambio de apariencia es ligero y coincide con la respuesta positiva, abundante (++) cuando la concentración del metabolito es la suficiente para generar un cambio notorio, y ausencia (-) cuando no se presentó ninguna reacción que indique una respuesta favorable.

Tabla 1. Resultado de las pruebas micoquímicas.

Metabolito	Extracto metanólico	Extracto acetato de etilo	Extracto hexánico
Carbohidratos	++	++	+
Proteínas	+	++	++
Alcaloides	+	+	+
Flavonoides	-	-	-
Taninos	-	-	-
Cumarinas	++	-	-
Quinonas	+	++	-
Saponinas	-	-	-
Sesquiterpenlactonas	+	++	+
Glicósidos cardiacos	++	++	++
Glicósidos cianogénicos	+	+	+
Azucares reductores	-	-	-

Los tres extractos de *Lentinula edodes* presentaron carbohidratos y proteínas. Con respecto a los demás metabolitos identificados, se tuvo presencia de alcaloides, sesquiterpenlactonas, glicósidos cardíacos y glicósidos cianogénicos. Resultados similares se reportaron con dos extractos acuosos de cepas de *Lentinus*, donde también se tuvo presencia de alcaloides, metabolitos secundarios los cuales ya han demostrado tener actividad antibacteriana (Maysaroh et al., 2025).

Se obtuvo presencia de sesquiterpenlactonas en el extracto hexánico y metanólico, mientras que en el extracto de acetato de etilo se obtuvieron de manera abundante, se ha evidenciado que estos metabolitos presentan actividad antimicrobiana (Ruiz-Reyes y Suárez, 2018)

Por otro lado, en el extracto metanólico se presentó abundancia de cumarinas. Los distintos derivados de estas moléculas se asocian con importantes propiedades biológicas en el ámbito de la salud, entre ellas la actividad antibacteriana (Flores-Morales et al., 2023).

Así mismo, la presencia de quinonas en el extracto metanólico y abundancia del mismo grupo de metabolitos en el extracto de acetato de etilo. Las quinonas cobran relevancia al ser metabolitos secundarios presentes en plantas y hongos, destacando su variedad de actividades biológicas, entre ellas la antibacteriana demostrada tanto para bacterias Gram positivas como Gram negativas (Dahlem et al., 2022). Por último, no se encontraron flavonoides, saponinas, taninos o azúcares reductores en ninguno de los tres extractos a diferentes polaridades.

Las pruebas antibacterianas cualitativas (Tabla 2) se miden conforme a la escala de sensibilidad de Duraffourd, donde se clasifica como resistente (-) si el promedio del triplicado del diámetro de los halos fue ≤ 8 mm, sensibilidad limitada (+) de 8.1-14.9 mm, sensibilidad intermedia (++) de 15-19 mm y sumamente sensible (+++) ≥ 20 mm (Krklec Torres y Morales-Cauti, 2022).

Tabla 2. Promedio de los halos de inhibición de los extractos para la prueba Kirby-Baüer.

Bacteria		Diámetro de inhibición en mm (1).			
Nombre	Gram	Extracto metanólico	Extracto acetato de etilo	Extracto hexánico	Cloranfenicol promedio
Staphylococcus aureus	+	17.9 ± 0.46	12.8 ± 1.25	10.33 ± 1.72	44.18 ± 1.09
Bacillus subtilis	+	15.6 ± 0.78	20.43 ± 4.08	11.83 ± 1.1	35.68 ± 3.51
Yersinia enterocolitica	-	11.9 ± 2.45	12.7 ± 0.90	7.9 ± 1.35	33.95 ± 4.61
Escherichia col.	-	6 ± 0.06	12.6 ± 3.12	7.57 ± 1.33	38.23 ± 6.7
Pseudomonas aeruginosa	-	6.2 ± 0.1	8.33 ± 0.51	6 ± 0.00	6 ± 0.00

(1) Promedio de tres repeticiones y la desviación estándar de la media.

El extracto de acetato de etilo demostró mayor actividad antibacteriana en comparación con los otros dos extractos, teniendo inhibición tanto para las bacterias Gram negativas como Gram positivas con el mayor halo de inhibición registrado contra *Bacillus subtilis*. Por el contrario, el extracto hexánico tuvo una sensibilidad limitada y resistencia frente a las bacterias Gram negativas, donde se registró el menor diámetro que fue de 6 mm (considerado como resistente). Esto supera los resultados obtenidos por García et al. (2021) que obtuvieron un rango de halos de inhibición de 6 a 16 mm con extractos acuosos y metanólicos de *Lentinula edodes* contra bacterias Gram positivas.

En cuanto al extracto metanólico para *Escherichia coli*, y las pruebas con el extracto hexánico y metanólico contra *Pseudomonas aeruginosa* se obtuvo resistencia de las bacterias, esto no descarta su potencial antibacteriano, ya que, comparando con otros autores, las diferencias entre la metodología de las pruebas y la extracción de los metabolitos pueden afectar los resultados (Chowdhury, 2015).

Una vez obtenidos los resultados de las pruebas cualitativas, las bacterias que resultaron sensibles a los sensidiscos fueron sometidas a una segunda prueba para determinar su concentración mínima inhibitoria, que será la concentración más baja del extracto en la que no se observa crecimiento bacteriano**.** El promedio del triplicado de cada prueba se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Concentración mínima inhibitoria de extractos crudos de *Lentinula edodes* contra cepas bacterianas.

Bacteria	**MIC (mg/ml) (1).**		
	Extracto metanólico	Extracto de acetato de etilo	Extracto hexánico
Staphylococcus aureus	1.00	3.00	12.00
Bacillus subtilis	1.00	0.75	1.50
Yersinia enterocolitica	2.00	3.00	1.50
Escherichia coli	-	5.00	10.00
Pseudomonas aeruginosa	-	8.00	-

Respaldando los resultados obtenidos en las pruebas cualitativas, el extracto de acetato de etilo tuvo la concentración mínima inhibitoria más baja contra *Bacillus subtilis*, siendo esta de 0.75 mg/mL, mientras que los otros dos extractos tuvieron valores levemente superiores contra la misma bacteria, para las bacterias Gram negativas se tuvo un valor máximo de 10 mg/mL contra *Escherichia coli*.

Los extractos evaluados presentaron un desempeño comparable que lo reportado en estudios previos con resultados de otros hongos estudiados incluido el shiitake, donde se reportaron valores de 1mg/mL hasta 9 mg/mL contra diferentes cepas bacterianas (Chowdhury, 2015). Ahora bien, de manera general la concentración más alta se obtuvo contra la bacteria Gram positiva *Staphylococcus aureus* con un valor de 12 mg/mL.

En conjunto, los extractos mostraron una actividad antimicrobiana superior a la reportada en investigaciones anteriores, lo que refuerza la necesidad de continuar explorando compuestos naturales para enfrentar la resistencia bacteriana.

CONCLUSIONES

El extracto metanólico se obtuvo en mayor rendimiento en comparación a los demás.
El perfil micoquímico demostró la presencia de metabolitos esenciales y metabolitos secundarios en los tres extractos.

Los extractos crudos de *Lentinula edodes* mostraron actividad antibacteriana frente a diversos microorganismos patógenos, lo que sugiere la presencia de compuestos bioactivos con potencial terapéutico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chowdhury, M., Kubra, K., & Ahmed, S. (2015). Screening of antimicrobial, antioxidant properties and bioactive compounds of some edible mushrooms cultivated in Bangladesh. Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials, 14, 8. https://doi.org/10.1186/s12941-015-0067-3
2. Corzo, D. C. (2012). Evaluación de la actividad antimicrobiana del extracto etanólico de Cestrum buxifolium Kunth. Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, 43(3), 25–32. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-01952012000300009
3. Dahlem Junior, M. A., Nguema Edzang, R. W., Catto, A. L., & Raimundo, J. M. (2022). Quinones as an Efficient Molecular Scaffold in the Antibacterial/Antifungal or Antitumoral Arsenal. *International journal of molecular sciences*, *23*(22), 14108. https://doi.org/10.3390/ijms232214108
4. Fernández, P., Haza, A. I., & Morales, P. (2020). Propiedades funcionales de hongos comestibles. *Agro Sur, 48*(1), 11–24. https://doi.org/10.4206/agrosur.2020.v48n1-0211
5. Flores-Morales, V., Villasana-Ruíz, A. P., Garza-Veloz, I., González-Delgado, S., & Martinez-Fierro, M. L. (2023). Therapeutic effects of coumarins with different substitution patterns. Molecules, 28(5), 2413. https://doi.org/10.3390/molecules28052413
6. Garcia, J., Afonso, A., Fernandes, C., Nunes, F. M., Marques, G. & Saavedra, M. J. (2021). Comparative antioxidant and antimicrobial properties of Lentinula edodes Donko and Koshin varieties against priority multidrug-resistant pathogens. *South African Journal of Chemical Engineering*, 35, 98–106. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.09.008
7. Giono-Cerezo, S., Santos-Preciado, J. I., Morfín-Otero, M. del R., Torres-López, F. J., & Alcántar-Curiel, M. D. (2020). *Resistencia antimicrobiana: importancia y esfuerzos por contenerla*. *Gaceta Médica de México*, 156(2), 172–180. https://doi.org/10.24875/GMM.20005624
8. Hudzicki, J. (2009, 8 de diciembre). Kirby-Bauer disk diffusion susceptibility test protocol. American Society for Microbiology. https://asm.org/protocols/kirby-bauer-disk-diffusion-susceptibility-test-pro
9. *Krklec Torres, S., & Morales-Cauti, S. (2022). Actividad antimicrobiana del aceite esencial del kion (Zingiber officinale) sobre cepas de Streptococcus causantes de linfadenitis cervical en cuyes. Salud y Tecnología Veterinaria, 10(1), 16–25. https://doi.org/10.20453/stv.v10i1.4236*
10. Manual de productos naturales de la UPIBI-IPN. (s.f.). UPIBI-IPN

11. Maysaroh, A. N., Witasari, L. D., & Darmasiwi, S. (2025). Identification, antimicrobial activity, and mycochemicals of Lentinus spp. cultivated in papaya peel medium. Journal of Applied Biology & Biotechnology, 13(2), 104–112. https://doi.org/10.7324/JABB.2025.213846
12. Mayett, Y., y Martínez-Carrera, D. (2019). Introducción. En D. Martínez-Carrera, Y. Mayett, & M. R. Maimone Celorio (Eds.), El consumo de los hongos comestibles y su relevancia en la seguridad alimentaria de México (cap. 3). Colegio de Postgraduados.
13. Montes-de-Oca-Márquez, C., Hernández-Delgado, C. T., & Orozco-Martínez, J. (2017). Actividad antibacteriana y antifúngica de Dalea carthagenensis (Jacq.) J. F. Macbr. Revista Fitotecnia Mexicana, 40(2), 161–168. https://www.redalyc.org/journal/610/61051413008/
14. Rúa-Giraldo, Á. L. (2023, agosto 31). Taxonomía de los hongos: un rompecabezas al que le faltan muchas piezas. Biomédica, 43(Supl. 1), 288–311. https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/7052
15. Ruiz-Reyes, E., & Suarez, M. (2018). Lactonas sesquiterpénicas. Diversidad estructural y sus actividades biológicas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, *46*(1), 9-24. Recuperado a partir de https://revista.cnic.cu/index.php/RevBiol/article/view/91

LA APLICACIÓN FOLIAR DE TITANIO (Ti) AFECTA CRECIMIENTO INICIAL Y UNIDADES SPAD EN ACELGA

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1]; Fernando Carlos Gómez-Merino[1]; Libia Iris Trejo-Téllez[1]; Juan Valente Hidalgo-Contreras[2]

[1]Colegio de Posgraduados Campus Montecillo. [2]Colegio de Posgraduados Campus Córdoba.
carbajal.victor@colpos.mx

RESUMEN

En los suelos, el titanio (Ti) se encuentra en minerales como rutilo (TiO_2) e ilmenita ($FeTiO_3$); su forma de mayor disponibilidad para las plantas es Ti^{4+}, y actualmente se considera un elemento benéfico por su capacidad de mejorar la absorción de nutrientes y parámetros de germinación. La acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), perteneciente a la familia Amaranthaceae, y se caracteriza por su tolerancia a estrés abiótico como sequía, inundaciones y fluctuaciones de temperatura. Además, es un cultivo de alto valor nutricional, ya que aporta ácidos grasos, compuestos bioactivos, fibras y minerales. A través de la siembra de semilla de acelga cv. Fordhook Giant en charolas de unicel de 200 cavidades, se obtuvo el material vegetal utilizado en este estudio. Plántulas de 20 d de edad se trasplantaron en macetas negras (0.8 L) con una mezcla de turba blanca y tezontle (1:1; v:v). Los tratamientos foliares (0, 5 y 10 mM Ti) se iniciaron a los 30 días después de la siembra (dds) mediante aspersión hasta punto de goteo. Se utilizó un diseño completamente al azar, cada tratamiento tuvo tres repeticiones, y la unidad experimental fue una planta por maceta. Se realizaron tres aplicaciones en intervalos de 10 d (30, 40 y 50 dds) a las 6:00 h. A los 60 dds se midieron altura de planta, número de hojas y unidades SPAD. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y comparación de medias por la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$). La altura de planta y las unidades SPAD no fueron influenciadas en forma significativa por las dosis de Ti. Sin embargo, el número de hojas del tratamiento con 10 mM Ti fue 70% mayor al tratamiento testigo, y 23% superior al tratamiento con 5 mM Ti. Se concluye que la aplicación foliar de Ti influye diferencialmente en el crecimiento inicial de la acelga, destacando el incremento en el número de hojas a 10 mM Ti.

INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria enfrenta desafíos derivados del crecimiento poblacional, la escasez de alimentos y el deterioro de los recursos naturales, lo que dificulta el acceso de parte de la población a una alimentación adecuada. La agricultura desempeña un papel fundamental para alcanzar la seguridad, soberanía y autosuficiencia alimentaria, por lo que, es indispensable promover prácticas que fortalezcan la agricultura sostenible y la producción de alimentos (Valeriano *et al*., 2026). La bioestimulación es una opción dentro de la sostenibilidad agrícola que ha surgido como una alternativa para mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos.

El titanio (Ti) es un elemento de transición del grupo 4 de la tabla periódica de los elementos químicos, con número atómico 22 y masa atómica de 47.87 g mol^{-1}. Físicamente destaca por su color gris plateado, baja densidad (4.51 g cm^{-3}) y una elevada relación resistencia-peso. Su punto de fusión se sitúa en los 1 668 °C y el de ebullición en 3 287 °C. Presenta un comportamiento alótropo, variando de una estructura hexagonal compacta (alfa) a una cúbica centrada en el cuerpo (beta) al superar los 882 °C. Sus estados de oxidación principales son Ti^{+2}, Ti^{+3} y Ti^{+4}, siendo este último el más estable, además de presentar una excelente biocompatibilidad biológica (Veiga *et al*., 2012; González, 2013; Thomas, 2016). En los suelos, el Ti se encuentra en minerales como rutilo (TiO_2) e ilmenita ($FeTiO_3$); su forma de mayor disponibilidad para las plantas es Ti^{4+}, y actualmente se considera un elemento benéfico por su capacidad de mejorar la absorción de nutrientes y parámetros de germinación (Lyu *et al*., 2017; Carbajal-Vázquez *et al*., 2022).

La acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), es una hortaliza de hoja que pertenece a la familia Amaranthaceae. Se caracteriza por su tolerancia al estrés abiótico, como sequía, inundaciones y fluctuaciones de temperatura. Además, es un cultivo de alto valor nutricional, ya que aporta ácidos grasos, compuestos bioactivos, fibra y minerales, los cuales hacen que la acelga sea un alimento importante dentro de la dieta humana (Puccinelli *et al*., 2022; SADER, 2025).

TEORÍA

Existe evidencia en la literatura científica sobre el uso del titanio como bioestimulante. Por ejemplo: la aplicación foliar de nanopartículas de TiO_2 mitiga el daño oxidativo y mejora la tolerancia a la sequía en plántulas de vid al activar mecanismos de defensa antioxidante y mejorar parámetros fisiológicos (Daler *et al*., 2024). En tomate el Ti promueve el crecimiento, la tolerancia al estrés y la resistencia a patógenos. Su aplicación activa genes de replicación de ADN, proteínas ribosómicas y señalización hormonal, además eleva la capacidad antioxidante celular (Ma *et al*., 2025). Asimismo, modifica la calidad del fruto al reducir el pH e incrementar la relación SST/AT como efecto principal, y mejora la relación SST/AT en condiciones de alta salinidad (Carbajal-Vázquez *et al*., 2020). De igual forma, mejora indicadores de color que optimizan la calidad del tomate (Carbajal-Vázquez *et al*., 2023). En plantas de girasol, el Ti mejora el rendimiento, la nutrición y el contenido de aceite, provocando además una maduración temprana de la planta (Kolenčík *et al*., 2020).

Lo anterior coloca al Ti como un detonante de mecanismos adaptativos en las plantas para hacer frente a factores de estrés biótico y abiótico, al mismo tiempo que fundamenta su viabilidad en el uso agrícola. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del Ti aplicado vía foliar a plántulas de acelga cv. Fordhook Giant en parámetros de crecimiento inicial.

PARTE EXPERIMENTAL

Se sembraron semillas de acelga cv. Fordhook Giant en una charola de unicel de 200 cavidades y usando turba blanca como sustrato (Súper Terra ST1 Hawita), para obtener el material vegetal utilizado en este estudio. La humedad del semillero se mantuvo agregando agua del grifo cada tercer día, a razón de 500 mL de agua. Plántulas de 20 d de edad se trasplantaron en macetas negras (0.8 L) con una mezcla de turba blanca y tezontle (1:1; v:v). A partir de esta fase, las plántulas se mantuvieron con solución de Steiner (Steiner, 1984) al 50% hasta la cosecha. Los tratamientos foliares (0, 5 y 10 mM Ti) se iniciaron a los 30 días después de la siembra (dds) mediante aspersión foliar hasta punto de goteo. Se utilizó un diseño completamente al azar, cada tratamiento tuvo tres repeticiones, y la unidad experimental fue una planta por maceta. Se realizaron tres aplicaciones en intervalos de 10 d (30, 40 y 50 dds) a las 6:00 h. A los 60 dds se midió la altura de planta (AP) usando un flexómetro de 5 m (Wiseup; Yiwu, Zhejiang, China); el número de hojas (NH) se cuantificó mediante conteo manual del follaje; y las unidades SPAD usando un medidor portátil SPAD-502® meter (Minolta; Tokio, Japón). Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y comparación de medias por la prueba de Duncan ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS

La AP y las unidades SPAD no fueron influenciadas en forma significativa por las dosis de Ti. Sin embargo, se observó una tendencia del Ti a decrecer ambas variables con la dosis 10 mM, 5 y 2.3% respectivamente, con respeto al tratamiento testigo. En tanto que, en la variable NH, la aplicación foliar de 10 mM Ti fue 70% mayor al tratamiento testigo, y 23% superior al tratamiento con 5 mM Ti. (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Efecto del titanio (Ti) en plántulas de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) cv. Fordhook Giant, en variables morfológicas de crecimiento.

Ti (mM)	Altura de Planta (cm)	Número de Hojas	Unidades SPAD
0	23.25±1.10 a	14.25±2.39 b	47.85±3.58 a
5	23.25±1.10 a	19.75±2.32 ab	45.90±4.46 a
10	22.00±0.91 a	24.25±2.09 a	46.75±1.19 a

mM = milimolar. Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Duncan, $p \leq 0,05$).

CONCLUSIONES

Se concluye que la aplicación foliar de Ti influye diferencialmente en el crecimiento inicial de la acelga, destacando el incremento en el número de hojas con la dosis de 10 mM. Estos hallazgos sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, la dosis de 10 mM de Ti promovió principalmente la emisión de hojas, sin generar mejoras significativas en la altura de planta ni en el contenido relativo de clorofila.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Steiner, “The Universal Nutrient Solution”. *In*: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*, Lunteren, The Netherlands, 29 April–5 May 1984; I.S.O.S.C.: Wageningen, The Netherlands, 1984, pp. 633–649.
2. Veiga, J. P. Davim, A. J. R. Loureiro, “Properties and applications of titanium alloys: a brief review” Rev. Adv. Mater. Sci, Vol. 32, 2, 2012, pp. 133-148.
3. J. B. Thomas, “Titanium”. *In*: W. White, (eds) *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham, Switzerland, 2016.
4. L. González, “Trabajo de investigación bibliográfica estructura y propiedades de fatiga del titanio y sus aleaciones usadas como biomateriales”, Uni. Cienc. Tecn., Vol. 17, 67, 2013, pp. 92-108.
5. M. Kolenčík, D. Ernst, M. Urík, L. Ďurišová, M. Bujdoš, M., Šebesta, E. Dobročka, S. Kšinan, R. Illa, Y. Qian, H. Feng, I. Černý, V. Holišová, G. Kratošová, “Foliar application of low concentrations of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles to the common sunflower under field conditions” Nanomaterials, Vol. 10, 8, 2020, 1619.
6. M. Puccinelli, G. Carmassi, L. Botrini, A. Bindi, L. Rossi, J. F. Fierro-Sañudo, A. Pardossi, L. Incrocci, “Growth and mineral relations of *Beta vulgaris* var. *cicla* and *Beta vulgaris* ssp. *maritima* cultivated hydroponically with diluted seawater and low nitrogen level in the nutrient solution”, Horticulturae, Vol. 8, 7, 2022, 638. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070638
7. O. C. Valeriano, M. P. Sánchez, F. I. Ocampo, “Del traspatio a la mesa: aprovechamiento de cultivos para alimentación familiar en Cuilápam de Guerrero, Oaxaca, México”, Acta Univers., Vol. 36, 2026, e4533.
8. S. Daler, O. Kaya, N. Korkmaz, T. Kılıç, A. Karadağ, H. Hatterman-Valenti, “Titanium nanoparticles (TiO_2-NPs) as catalysts for enhancing drought tolerance in grapevine saplings”, Horticulturae, Vol. 10, 10, 2024, 1103.
9. S. Lyu, X. Wei, J. Chen, C. Wang, X. Wang, D. Pan, “Titanium as a beneficial element for crop production”, Front. Plant Sci. Vol. 8, 597, 2017.
10. SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). Acelga, una hortaliza muy nutritiva, 2023. Consultado en línea el 7 de mayo de 2025, de https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acelga-una-hortaliza-muy-nutritiva-332039
11. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, E. G. Alcántar-González, P. Sánchez-García, L. I. Trejo-Téllez. “Titanium increases the antioxidant activity and macronutrient concentration in tomato seedlings exposed to salinity in hydroponics”, Plants, Vol. 11, 1036, 2022.
12. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, J. A. Herrera-Corredor, A. Contreras-Oliva, G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez, “Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from

plants grown under salt stress conditions". Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca, Vol. 48, 2, 2020, pp. 924-937.
13. V. H. Carbajal-Vázquez, L. I. Trejo-Téllez, G. Alcántar-González, J. A. Herrera-Corredor, F. C. Gómez-Merino, "Silicon and titanium affect the percentage of juice and color attributes in tomato fruits of plants exposed to salt stress", Agro Productividad, Vol. 16, 4, 2023, pp. 3-12.
14. Y. B. Ma, W. L. Li, J. H. Li, M. J. Li, X. Y. Li, C. M. Wei, C. X. Li, Y. Wang, Y. Zhao, X. R. Ma, "Titanium ions promote tomato growth and increase stress resistance", BMC Plant Biol., Vol. 25, 1, 2025, 995.

DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA EN ESPECIES ARBÓREAS URBANAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO: BASE PARA LA ESTIMACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO

Fabiola Rojas-García, Guadalupe Hilario Amezquita

Universidad Nacional Rosario Castellanos
fabiosxto1981@gmail.com

RESUMEN

La densidad básica de la madera constituye una propiedad físico-anatómica fundamental para estimar con precisión la biomasa y, en consecuencia, el carbono almacenado en sistemas forestales urbanos. La Ciudad de México posee un bosque urbano integrado por parques, jardines, áreas verdes públicas y privadas, así como por el arbolado de alineación, que representa un socioecosistema capaz de almacenar carbono en su biomasa aérea forestal y participar en la regulación del ciclo urbano del carbono. La estimación rigurosa de este almacenamiento requiere valores locales de densidad básica para las especies más frecuentes, a fin de reducir la incertidumbre en inventarios y modelos de biomasa urbana. El objetivo del presente trabajo fue estimar la densidad básica de la madera de cuatro especies arbóreas ampliamente distribuidas en el suelo de desarrollo urbano de la Ciudad de México: *Ficus benjamina* L., *Jacaranda mimosifolia* D.Don, *Cedrela odorata* L. y *Liquidambar styraciflua* L. Se analizaron 30 muestras de diferentes individuos por especie, con diámetros a la altura del pecho entre 7.5 y 30 cm. Los especímenes fueron obtenidos a partir de actividades de manejo urbano y donados por la Planta de Composta de la Alcaldía Álvaro Obregón. El método destructivo permitió obtener rodajas de madera para determinar el volumen verde y el peso anhidro. La densidad básica se calculó como la relación entre peso seco y volumen verde. Los resultados evidenciaron diferencias interespecíficas relevantes. *Ficus benjamina* presentó una densidad básica promedio de 0.5478 ±0.044 g/cm³; *Jacaranda mimosifolia* registró 0.5313 ±0.059 g/cm³; *Cedrela odorata* mostró 0.6529 ±0.049 g/cm³; mientras que *Liquidambar styraciflua* alcanzó 0.6140 ±0.050 g/cm³. Las variaciones observadas reflejan diferencias anatómicas y funcionales asociadas con estrategias de crecimiento y soporte mecánico. Valores específicos de densidad básica mejoran la precisión de las estimaciones de biomasa aérea y fortalecen la construcción de líneas base para programas climáticos orientados al manejo sustentable del bosque urbano.

INTRODUCCIÓN

Las ciudades concentran una proporción creciente de la población mundial y generan modificaciones importantes sobre los ciclos biogeoquímicos, particularmente sobre el ciclo global del carbono [1]. El incremento de superficies impermeables, emisiones de gases de efecto invernadero y pérdida de cobertura vegetal urbana ha impulsado el interés por comprender el papel ecológico del bosque urbano como componente estratégico para la mitigación del cambio climático [2]. Los árboles urbanos, parques, jardines y áreas verdes contribuyen al almacenamiento de carbono atmosférico mediante la acumulación de biomasa aérea forestal, además de proporcionar servicios ecosistémicos relacionados con regulación térmica, infiltración de agua y mejora de la calidad del aire [3].

Los bosques urbanos representan sistemas socioecológicos complejos donde interactúan factores ambientales, sociales y de manejo. Su capacidad de captura y almacenamiento de carbono depende de variables estructurales como composición florística, densidad arbórea, edad de los individuos y propiedades físico-anatómicas de la madera [4]. Entre dichas propiedades, la densidad básica constituye uno de los parámetros más relevantes para estimar biomasa forestal debido a su relación directa con el contenido de materia seca [5].

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de valores específicos de densidad reduce la incertidumbre en modelos alométricos y mejora la precisión de los inventarios de carbono [6, 7]. Chave et al. (2014) señalaron que la densidad básica representa una variable funcional clave para cuantificar biomasa en ecosistemas forestales tropicales y subtropicales, particularmente cuando existen diferencias anatómicas entre especies arbóreas [8].

Asimismo, investigaciones recientes sobre bosque urbano destacan la necesidad de generar bases de datos locales para especies ornamentales y de alineación presentes en ciudades latinoamericanas [9].

México cuenta con numerosos estudios enfocados en biomasa y almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales naturales; sin embargo, persisten vacíos de información relacionados con especies urbanas ampliamente utilizadas en áreas verdes metropolitanas [10]. Las condiciones ambientales propias de las ciudades, tales como compactación del suelo, estrés hídrico, contaminación atmosférica y podas frecuentes, pueden modificar patrones de crecimiento y propiedades de la madera, por lo que resulta necesario desarrollar evaluaciones específicas para ambientes urbanos.

Ficus benjamina, Jacaranda mimosifolia, Cedrela odorata y *Liquidambar styraciflua* representan especies frecuentes dentro del bosque urbano de la Ciudad de México debido a sus atributos ornamentales, capacidad de adaptación y amplia distribución en espacios públicos y privados[11]. No obstante, existe información limitada sobre la densidad básica de su madera bajo condiciones urbanas.

El objetivo del presente estudio consistió en estimar la densidad básica de la madera de cuatro especies arbóreas urbanas de la Ciudad de México, con la finalidad de contribuir al fortalecimiento de inventarios de biomasa aérea y almacenamiento de carbono en ecosistemas urbanos.

TEORÍA

La densidad básica de la madera corresponde a la relación entre el peso anhidro y el volumen verde de un espécimen leñoso. La propiedad expresa la cantidad de materia seca contenida en un volumen determinado y constituye uno de los parámetros tecnológicos más utilizados para caracterizar especies forestales. Las variaciones en la densidad responden a diferencias anatómicas relacionadas con tamaño de vasos, proporción de fibras, espesor de paredes celulares y contenido de parénquima [12].

Las especies con densidades elevadas suelen presentar mayor resistencia mecánica, menor contenido de humedad y crecimiento más lento, mientras que las especies de baja densidad desarrollan tejidos menos compactos asociados con estrategias de crecimiento rápido. Las relaciones funcionales entre densidad y fisiología vegetal permiten interpretar procesos de adaptación ecológica frente a disponibilidad hídrica, temperatura y perturbaciones ambientales. Los estudios desarrollados en ecología funcional han identificado a la densidad de la madera como un rasgo asociado con supervivencia, eficiencia hidráulica y almacenamiento de carbono en especies forestales tropicales y templadas [13].

Las estimaciones de biomasa forestal utilizan frecuentemente la densidad básica debido a su capacidad para transformar volumen en peso seco. Los modelos alométricos contemporáneos consideran esta variable como componente indispensable para mejorar la precisión de cálculos relacionados con biomasa aérea y carbono almacenado. Las ecuaciones pantropicales desarrolladas por Chave et al. incorporan la densidad básica como predictor principal de biomasa aérea y muestran reducciones significativas en errores de estimación [13]. Los trabajos realizados en ecosistemas forestales mexicanos también han demostrado la relevancia de esta propiedad para fortalecer estimaciones regionales de biomasa y carbono forestal [14, 15].
Las condiciones ambientales presentes en ciudades generan modificaciones fisiológicas capaces de influir sobre propiedades anatómicas de la madera. El estrés hídrico, la contaminación atmosférica,

la compactación del suelo y las prácticas de manejo intensivo favorecen respuestas adaptativas relacionadas con incremento de tejidos de soporte y variaciones en crecimiento radial, aspectos que pueden modificar los valores de densidad básica en árboles urbanos[16].

Los estudios sobre bosque urbano han señalado que la estructura y funcionalidad de los árboles urbanos difieren respecto a individuos establecidos en ecosistemas forestales naturales, particularmente bajo condiciones de estrés ambiental permanente [17]

La importancia de la densidad básica trasciende el ámbito tecnológico de la madera y adquiere relevancia dentro de estrategias de mitigación climática urbana. Los inventarios de carbono urbano requieren parámetros específicos para reducir incertidumbre en estimaciones de biomasa aérea forestal [18].

Los valores genéricos de densidad pueden provocar sobreestimaciones o subestimaciones significativas del carbono almacenado, especialmente en ciudades con alta diversidad de especies ornamentales y de alineación. Los estudios enfocados en servicios ecosistémicos urbanos han destacado la necesidad de desarrollar bases de datos locales para fortalecer programas de monitoreo climático y planeación sustentable del bosque urbano [19].

Las bases de datos nacionales sobre densidad básica de la madera han contribuido al desarrollo de estudios forestales y modelos de carbono en México [20].

La información disponible para especies urbanas permanece limitada, particularmente bajo condiciones ambientales propias de grandes metrópolis. La generación de valores locales de densidad básica representa una contribución importante para mejorar la precisión de inventarios de carbono y fortalecer estrategias de mitigación asociadas con infraestructura verde urbana.

PARTE EXPERIMENTAL

La investigación se desarrolló con muestras de madera de cuatro especies arbóreas ampliamente distribuidas dentro del bosque urbano de la Ciudad de México: *Ficus benjamina* L., *Jacaranda mimosifolia* D.Don, *Cedrela odorata* L. y *Liquidambar styraciflua* L.

Los ejemplares fueron donados por la Planta de Composta de la Alcaldía Álvaro Obregón como parte de actividades de manejo y retiro de arbolado urbano. La utilización de material proveniente de manejo forestal urbano permitió aprovechar residuos leñosos para fines de investigación relacionados con biomasa forestal y almacenamiento de carbono.

Las muestras correspondieron a individuos con diámetros a la altura del pecho entre 7.5 y 30 cm. El estudio consideró 30 muestras por especie obtenidas de diferentes individuos, con la finalidad de representar la variabilidad anatómica y estructural presente en árboles urbanos de distintas dimensiones y condiciones de crecimiento.

La obtención de las muestras se realizó mediante el método destructivo utilizando rodajas de madera extraídas del fuste principal. Las rodajas fueron etiquetadas y trasladadas al laboratorio para su procesamiento (Figura 1).



Figura 1. Donación de material botánico por parte de la Planta de Composta de la Alcaldía Ávaro Obregón.

La preparación de las muestras incluyó limpieza superficial y eliminación de material deteriorado o con presencia de pudrición, con el propósito de evitar alteraciones en las mediciones de volumen y peso seco. La determinación del volumen verde se realizó considerando la geometría de cada espécimen. Las mediciones de diámetro y espesor se obtuvieron utilizando vernier digital y regla milimétrica. El cálculo del volumen se efectuó mediante fórmulas geométricas aplicadas a cilindros, expresando los resultados en centímetros cúbicos. El proceso de secado inició mediante exposición al aire libre bajo condiciones controladas de ventilación. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en estufa de secado a temperaturas entre 100 y 105 °C durante 24 h hasta alcanzar peso constante, siguiendo procedimientos utilizados en estudios tecnológicos y forestales de densidad de madera (Figura 2) [21].



Figura 2. Muestras de madera colocadas em estufa de secado.

La densidad básica de la madera se calculó como la relación entre el peso anhidro y el volumen verde de cada muestra, expresando los resultados en g/cm³. El análisis de los datos incluyó estadística descriptiva mediante cálculo de promedio y desviación estándar para cada especie. Los valores obtenidos permitieron comparar diferencias interespecíficas relacionadas con propiedades anatómicas y potencial de almacenamiento de biomasa aérea forestal.

RESULTADOS

Los valores de densidad básica obtenidos evidenciaron diferencias interespecíficas importantes entre las especies evaluadas del bosque urbano de la Ciudad de México (Tabla 1). Las variaciones registradas reflejan diferencias anatómicas y funcionales asociadas con estrategias de crecimiento, soporte mecánico y adaptación a condiciones ambientales urbanas.

Tabla 1. Densidad básica promedio de la madera en especies arbóreas urbanas de la Ciudad de México.

Especie	Nombre común	Densidad básica (g/cm³)	Desviación estándar	Clasificación de la madera
 ***Ficus benjamina* L.**	Ficus	0.5478	±0.044	 Pesada
 ***Jacaranda mimosifolia* D.Don**	Jacaranda	0.5313	±0.059	 Pesada
 ***Cedrela odorata* L.**	Cedro rojo	0.6529	±0.049	 Muy pesada

 ***Liquidambar styraciflua* L.**	Liquidámbar	0.6140	±0.050	 Muy pesad

Ficus benjamina presentó una densidad básica promedio de 0.5478 ±0.044 g/cm³, valor correspondiente a maderas clasificadas como pesadas. La especie mostró variabilidad moderada entre individuos, posiblemente relacionada con diferencias en edad, manejo urbano y disponibilidad hídrica. Las características anatómicas de Ficus benjamina, particularmente la proporción de fibras y vasos de conducción, favorecen una estructura relativamente compacta capaz de almacenar cantidades importantes de biomasa aérea.

Jacaranda mimosifolia registró una densidad básica promedio de 0.5313 ±0.059 g/cm³. Los valores observados indican una madera pesada con menor densidad respecto a las demás especies analizadas. La desviación estándar obtenida sugiere una mayor heterogeneidad anatómica entre individuos urbanos. Las condiciones de crecimiento presentes en áreas urbanas pueden modificar la formación de tejidos leñosos debido a variaciones microclimáticas, compactación del suelo y disponibilidad irregular de agua.

Cedrela odorata presentó la mayor densidad básica promedio con 0.6529 ±0.049 g/cm³, valor correspondiente a madera muy pesada. Los resultados difieren de algunos reportes clásicos para ambientes tropicales naturales, donde la especie suele clasificarse como madera ligera a moderadamente pesada. Las diferencias observadas podrían relacionarse con condiciones urbanas restrictivas que favorecen mayor proporción de tejidos de soporte y crecimiento radial reducido.

Liquidambar styraciflua alcanzó una densidad básica promedio de 0.6140 ±0.050 g/cm³, clasificándose también como madera muy pesada. Los valores registrados coinciden con investigaciones desarrolladas en especies templadas sujetas a condiciones ambientales restrictivas. La capacidad de formar tejidos compactos representa una ventaja funcional relacionada con resistencia mecánica y tolerancia al estrés ambiental urbano.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de utilizar valores específicos de densidad básica para estimaciones de biomasa aérea forestal y almacenamiento de carbono en bosque urbano. Las ecuaciones alométricas que utilizan valores genéricos de densidad pueden generar sobreestimaciones o subestimaciones significativas del carbono almacenado, particularmente en ciudades con alta diversidad de especies ornamentales y de alineación [22].

La variabilidad observada entre especies coincide con investigaciones enfocadas en ecología funcional y propiedades tecnológicas de la madera. Los análisis globales realizados por Hidayat et al. (1994) documentaron que la densidad básica representa un rasgo funcional estrechamente asociado con estrategias ecológicas y adaptación climática de las especies forestales [23].

La información generada en el presente estudio representa una contribución relevante para fortalecer inventarios de carbono urbano en la Ciudad de México. Los valores obtenidos permiten reducir incertidumbre en modelos de biomasa aérea y aportan información útil para programas de mitigación climática, planeación urbana y manejo sustentable del bosque urbano.

CONCLUSIONES

La densidad básica de la madera representó una propiedad funcional clave para estimar biomasa aérea forestal y almacenamiento de carbono en especies arbóreas urbanas de la Ciudad de México. Los resultados evidenciaron diferencias interespecíficas importantes entre *Ficus benjamina*, *Jacaranda mimosifolia, Cedrela odorata* y *Liquidambar styraciflua*, asociadas con características anatómicas y estrategias de adaptación al ambiente urbano.

La utilización de valores específicos de densidad básica mejora la precisión de inventarios de carbono urbano y reduce incertidumbre en modelos alométricos utilizados para cuantificar biomasa aérea. La información generada fortalece las bases técnicas para programas de mitigación climática y manejo sustentable del bosque urbano en ciudades mexicanas. Asimismo, el estudio contribuye al conocimiento de propiedades físico-anatómicas de especies ampliamente utilizadas en áreas verdes y arbolado de alineación bajo condiciones ambientales urbanas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nowak, D.J., et al., *Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States.* Environmental Pollution, 2013. 178: p. 229-36.
2. Fuchs, J., R. Riffo-Pérez, and L. Prado. *Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámica y desafíos para el cambio estructural*. 2017; Available from: https://www.cepal.org/es/publicaciones/42141-desarrollo-sostenible-urbanizacion-desigualdad-americalatina-caribe-dinamicas.
3. Tian, H., et al., *Urban tree carbon storage estimation using unmanned aerial vehicles remote sensing.* Urban Forestry & Urban Greening, 2025. 107.
4. Weber, J.C., et al., *Variation in growth, wood density and carbon concentration in five tree and shrub species in Niger.* New Forests, 2017. 49(1): p. 35-51.
5. Goche-Télles, R., et al., *Densidad básica y ancho de anillos de la madera de Pinus patula antes y después de un aclareo.* Interciencia, 2003. 28(12): p. 705-709.
6. Rojas-García, F. and L. Villers, *Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla.* Ciencia Forestal En México, 2008. 33(104): p. 59-86.
7. Rojas-García, F., et al., *Impact of timber harvesting on carbon storage in montane forests of central Mexico.* New Forests, 2019. 50: p. 1043-1061.
8. Chave, J., et al., *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees.* Global Change Biology, 2014. 20(10): p. 3177-90.
9. Castañeda-Aguado, D., et al., *Monitoreo Ambiental Participativo, un paso hacia la gobernanza en las ciudades: Una revisión para América Latina.* Revista Latinoamericana de Difusión Científica, 2026. 8(14): p. 304-325.
10. Mijangos-Hernández, A.I., F. Rojas-García, and H.M. Benavides-Meza, *Estimación del contenido y captura de carbono en la biomasa arbórea del Bosque de San Juan de Aragón, Distrito Federal*, in *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*, F. Paz-Pellat and J.C. Wong-González, Editors. 2015, Programa Mexicano del Carbono A.C.: México. p. 133-139.
11. Rodríguez Sánchez, L. and E. Cohen Fernández, *Guía de árboles y arbustos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. 2003, México: REMUCEAC-Uaniversidad Autónoma Metropolitana 383.
12. Rojas-García, F. and L. Villers Ruiz, *Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de Pinus hartwegii Lindl. del Volcán La Malinche.* Madera y Bosques, 2005. 11(1): p. 63-71.
13. Brown, S., A. Gillespie, and A.E. Lugo, *Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data.* Forest Science, 1989. 35: p. 881—902.
14. Goche Télles, J.R., et al., *Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de Abies religiosa y de Pinus ayacahuite var. veitchii.* Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2000. 6(1): p. 83-92.
15. Pérez Olvera, C.d.l.P., et al., *Características tecnológicas de la madera de dos especies de Quercus de Durango, México.* Madera y Bosques, 2015. 21: p. 19-46.

16. Angela, C.-B., et al., *Hydrological evaluation of a peri-urban stream and its impact on ecosystem services potential.* Global Ecology and Conservation, 2015. 3: p. 628-644.
17. Kim, I., et al., *Impact of urban forest structure, native species diversity, and vegetation community on invasive plant species richness.* Urban Ecosystems, 2024. 28(2).
18. Sandim, A., et al., *New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications.* Forests, 2023. 14(8).
19. Nowak, D., et al., *Effects of Urban Tree Management and Species Selection on Atmospheric Carbon Dioxide.* Arboriculture & Urban Forestry, 2002. 28(3): p. 113-122.
20. Ordóñez, J., et al., *Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación.* Madera y Bosques, 2015. 21: p. 77-216.
21. Valencia Manzo, S. and J. Vargas Hernández, *Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera.* Madera y Bosques, 1997. 3(1): p. 81-87.
22. Martin, A.J.F., et al., *The Structural Diversity of Canada's Urban Forests: A National Summary and an Analysis of Street Tree Size Across Ecozones, City Sizes, and Within Cities.* Journal of Forestry, 2025.
23. Hidayat, S. and W.T. Simpson, *Use of Green Moisture Content and Basic Specific Gravity to Group Tropical Woods for Kiln Drying*. 1994, USA: United States Department of Agriculture-Forest Service. 39.

EVALUACIÓN DE UN CONSORCIO MICROBIANO ENCAPSULADO Y SU EFECTO EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO TEMPRANO DE JITOMATE

Fabiola Araceli García Zetina[1], Juan José Onofre Reyes, Verónica Janette Cedeño Garcidueñas, Omar Augusto Sánchez Ortiz, Gilberto Espinoza Quiroz, Claudia Palomares Rodríguez, Jaime Piñon Flores

[1]Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle de Morelia
fgarcia_exportfruitcenter@hotmail.com

RESUMEN

Durante las últimas décadas, la agricultura convencional ha permitido aumentar de manera importante la producción de alimentos; sin embargo, este crecimiento ha generado diversos problemas ambientales, como la pérdida de la diversidad microbiológica, la erosión del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la contaminación, afectando directamente el desarrollo de las plantas. Cuando las comunidades microbianas del suelo se desequilibran, se reduce la productividad de los cultivos y dificultando la germinación y el establecimiento temprano de las plantas, especialmente cuando existen condiciones adversas como la falta de agua o la presencia de microorganismos que causan enfermedades. Por esta razón, actualmente existe la necesidad de buscar alternativas más sostenibles que permitan mejorar las condiciones del suelo y los cultivos sin afectar el equilibrio natural del ambiente. El uso de microorganismos benéficos ha tomado gran importancia, siendo una opción para favorecer el crecimiento vegetal y mejorar la salud del suelo. Estos microorganismos tienen la capacidad de facilitar la absorción de nutrientes, estimular el desarrollo de las plantas y reducir la presencia de organismos dañinos. Entre los más estudiados se encuentran *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis*, debido a los beneficios que aportan cuando interactúan con las raíces de las plantas. *Trichoderma harzianum* destaca por su capacidad para competir con hongos patógenos y favorecer el crecimiento radicular; *Pseudomonas fluorescens* contribuye a la disponibilidad de nutrientes y a la activación de mecanismos de defensa en las plantas; mientras que *Bacillus subtilis* produce compuestos antimicrobianos y ayuda a mejorar las condiciones del suelo. La combinación de estos microorganismos puede generar efectos complementarios que favorecen el desarrollo vegetal desde las primeras etapas de crecimiento. El objetivo de esta investigación fue evaluar la interacción de *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis* cuando se desarrollan de manera conjunta, con la finalidad de observar su comportamiento en un mismo ambiente y analizar su influencia en la germinación y el desarrollo inicial de las plantas, esto a través de un encapsulado que contiene óxido de grafeno. El encapsulado se formula a partir de una solución homogénea de alginato de sodio, conteniendo los microorganismos previamente cultivados. Posteriormente se añade gota a gota una solución de cloruro de calcio ($CaCl_2$), generando la formación de perlas de manera inmediata, dejándolas en la solución durante unos minutos para asegurar su estabilidad, para después ser lavadas con agua estéril con la finalidad de eliminar residuos. El efecto del consorcio microbiano se evalúa bajo condiciones controladas considerando indicadores como el porcentaje de germinación de semilla de jitomate, altura de planta, uniformidad del crecimiento y desarrollo radicular. Los resultados mostraron que los tres microorganismos coexisten de manera estable sin interferir negativamente en su desarrollo individual, demostrando su compatibilidad dentro del consorcio microbiano. Su acción conjunta favoreció la germinación de la semilla de jitomate y el desarrollo temprano de las plántulas, presentando mayor vigor, mejor uniformidad y un establecimiento más rápido en comparación con las condiciones donde no se aplicó el consorcio, representando una alternativa viable y sostenible para mejorar la producción agrícola.

INTRODUCCIÓN

La agricultura convencional desempeña un papel importante en el incremento de la productividad alimentaria para satisfacer las crecientes demandas de una población mundial en constante

aumento; sin embargo, no obstante, las prácticas intensivas, el uso excesivo de pesticidas y de fertilizantes, han provocado una degradación en la fertilidad del suelo, contaminación ambiental y alteración del microbioma del suelo (Upadhayay *et al.,* 2023).

Esta problemática es particularmente relevante en México, noveno productor mundial de hortalizas con un volumen de 16,523,000 toneladas registradas en 2022, donde estos cultivos constituyen componentes esenciales de la seguridad alimentaria y la economía agrícola nacional (SIAP, 2023). Los sistemas de producción hortícola predominantes en el país se caracterizan por prácticas intensivas basadas en monocultivos y el uso excesivo de agroquímicos sintéticos, lo que ha generado efectos adversos sobre la calidad del suelo, la biodiversidad microbiana edáfica y la salud humana (Subercaseaux et al., 202X). Las prácticas agrícolas convencionales alteran drásticamente la actividad microbiana del suelo mediante modificaciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, afectando parámetros clave como temperatura, humedad, pH y biodisponibilidad de nutrientes (Ibarra et al., 2021), lo que compromete servicios ecosistémicos fundamentales como la producción de biomasa vegetal, el ciclado de nutrientes y la retención hídrica (Díaz et al., 2021). En este contexto, es crucial transitar hacia prácticas agrícolas sostenibles que integren el uso de microorganismos benéficos capaces de reestablecer la salud del suelo y potenciar el crecimiento de los cultivos, reduciendo simultáneamente la dependencia de insumos químicos.

Entre los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) con mayor respaldo científico se encuentran *Pseudomonas fluorescens, Bacillus subtilis y Trichoderma harzianum*. Estos microorganismos ejercen efectos positivos sobre las plantas mediante diversos mecanismos que incluyen la producción de reguladores del crecimiento, la solubilización de nutrientes, la fijación de nitrógeno y la síntesis de metabolitos con actividad antimicrobiana (Glick, 2012). Por su parte, *Pseudomonas fluorescens* ejerce un efecto estimulador del desarrollo vegetal e inhibición de fitopatógenos a través de diversos mecanismos metabólicos, tales como la alta afinidad en la captación de hierro mediante la síntesis de sideróforos, la producción de ácido indolacético y la secreción de metabolitos secundarios y enzimas hidrolíticas (Oteino et al., 2015). Asimismo, *Trichoderma harzianum* actúa como agente de biocontrol y estimulador del crecimiento mediante la producción de enzimas líticas y el fortalecimiento de los mecanismos de defensa sistémica de las plantas (Harman et al., 2004). Sin embargo, la aplicación práctica de estos MPCV en condiciones de campo se ve severamente limitada por su vulnerabilidad ante factores ambientales como la desecación, fluctuaciones extremas de temperatura, radiación ultravioleta y estrés oxidativo, que comprometen la viabilidad de las poblaciones celulares y reducen la eficacia de las bioformulaciones durante su producción, almacenamiento, transporte y aplicación (Dolatabad, 2026).

Un método innovador que mejora la disponibilidad de MPCV es la encapsulación, la cual consiste en recubrir células microbianas vivas en una matriz polimérica para inmovilizarlas, protegerlas y liberarlas de forma controlada, sin perder su viabilidad y propiedades (Park y Chang, 2000). En consecuencia, la encapsulación de bacterias proporciona un microambiente más adecuado combinado con protección física para evitar un rápido declive de las poblaciones bacterianas (Fariba, 2021), a su vez facilita la entrega microbiana al suelo o a las superficies de las plantas (Dolatabad, 2026). Además, las bacterias encapsuladas poseen una vida útil prolongada e incluso pueden almacenarse a temperatura ambiente durante períodos relativamente largos (Yanhui, 2015). El alginato de sodio es uno de los portadores más utilizados para la encapsulación de MPCV, debido a su disponibilidad, no toxicidad y biocompatibilidad, además de que forma capsulas instantáneamente en presencia de cationes polivalentes (Jishma *et al*., 2021).

En este sentido, la incorporación de óxido de grafeno (OG) como aditivo nanoestructurado en el alginato representa una estrategia de vanguardia con alto potencial biotecnológico. Entre sus características el OG es un material que en su estructura presenta capas bidimensionales de átomos de carbono dispuestos en una red cristalina hexagonal, con una alta densidad de grupos funcionales de oxígeno (carboxilo, hidroxilo, carbonilo y epoxi) en la red de carbono (Lopes *et al*., 2021). Estas propiedades fisicoquímicas únicas del OG pueden mejorar la integridad estructural de las cápsulas, optimizar el intercambio de nutrientes entre el microambiente interno y la rizosfera, y potenciar la

interacción entre los microorganismos encapsulados y las raíces de las plantas, aspectos que en conjunto podrían incrementar la eficacia biológica del consorcio microbiano.

Entre las diversas técnicas de encapsulación disponibles, el método de extrusión por goteo es el más utilizado para la fabricación de microesferas de alginato cargadas con células microbianas, ya que combina facilidad de ejecución, bajo requerimiento de equipamiento especializado, escalabilidad industrial y, fundamentalmente, condiciones de operación no agresivas que preservan la integridad de las membranas celulares (Dolatabad, 2026).

Dicho lo anterior, el objetivo de esta investigación es encapsular *Bacillus subtillis*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma harziaunum* en presencia de óxido de grafeno, mediante la liberación controlada lo que aumente su supervivencia frente a los factores ambientales y que induzcan una mejor colonización de plantas de hortalizas.

TEORÍA

1. Microorganismos Promotores del Crecimiento Vegetal (MPCV)

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (MPCV) son un grupo diverso de bacterias, hongos y actinomicetos que ejercen efectos beneficiosos sobre el desarrollo de las plantas mediante mecanismos directos e indirectos (Glick, 2012). Entre los MPCV más estudiados destacan *Bacillus subtilis, Pseudomonas fluorescens y Trichoderma harzianum.*

Bacillus subtilis es una bacteria Gram-positiva formadora de endosporas que promueve el crecimiento vegetal mediante: (i) la producción de fitohormonas, particularmente ácido indolacético; (ii) la solubilización de fosfatos inorgánicos mediante la secreción de ácidos orgánicos; y (iii) la síntesis de lipopéptidos antifúngicos que ejercen biocontrol contra patógenos edáficos (Glick, 2012; Dolatabad, 2026). La capacidad de formar endosporas le confiere resistencia excepcional a condiciones ambientales adversas, lo que representa una ventaja biotecnológica para su uso en bioformulaciones.

Pseudomonas fluorescens es una bacteria Gram-negativa rizosférica que estimula el desarrollo vegetal: (i) la solubilización de fosfatos; (ii) la síntesis de sideróforos que facilitan la absorción de hierro y limitan su disponibilidad para patógenos; (iii) la síntesis de ácido indolacético; y (iv) la secreción de metabolitos secundarios antimicrobianos que incluyen antibióticos difusibles, compuestos volátiles y enzimas hidrolíticas (Oteino et al., 2015).

Trichoderma harzianum es un hongo filamentoso que actúa simultáneamente como agente de biocontrol y promotor del crecimiento vegetal. Sus mecanismos incluyen: (i) micoparasitismo directo sobre hongos fitopatógenos; (ii) antibiosis a través de metabolitos secundarios; (iii) competencia por nutrientes y espacio; (iv) inducción de resistencia sistémica en plantas hospederas; y (v) solubilización de fosfatos y micronutrientes que mejoran la disponibilidad de nutrientes (Harman et al., 2004; Altomare et al., 1999).

La co-inoculación de estas tres especies en un consorcio microbiano multiespecies permite aprovechar la complementariedad funcional y potenciales efectos sinérgicos de sus distintos mecanismos de acción, ampliando el espectro de beneficios sobre el crecimiento vegetal.

2. Limitaciones de los Inoculantes Microbianos y Estrategias de Formulación

A pesar del potencial biotecnológico de los MPCV, su aplicación práctica en campo enfrenta limitaciones significativas derivadas de su sensibilidad a factores ambientales adversos, tales como desecación, fluctuaciones de temperatura, radiación ultravioleta, pH extremo y estrés oxidativo, que provocan una rápida disminución de poblaciones viables durante la producción, almacenamiento, transporte y aplicación (Dolatabad, 2026).

Para superar estas limitaciones, la encapsulación de microorganismos ha emergido como una estrategia biotecnológica que consiste en la inmovilización de células microbianas vivas en matrices

poliméricas que les confieren protección física, regulan su liberación al entorno, y preservan su viabilidad durante períodos prolongados (Saberi et al., 2021). Esta tecnología ofrece múltiples ventajas: protección contra factores ambientales adversos, liberación controlada y gradual de los MPCV, incremento significativo de la vida útil del producto, mejora en la supervivencia durante transporte, facilitando su establecimiento en el suelo, y posibilidad de co-encapsulación de múltiples especies microbianas.

3. Matriz de Encapsulación

El alginato de sodio es un polisacárido aniónico natural extraído de algas pardas, compuesto por unidades de ácido β-D-manurónico y ácido α-L-glucurónico que se organizan en bloques a lo largo de la cadena (Hernández et al., 2018). Se ha consolidado como material preferente para la encapsulación de MPCV debido a su no toxicidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad, bajo costo y capacidad de formar hidrogeles mediante gelificación iónica instantánea al contacto con iones de calcio (Ca^{2+}), un proceso que ocurre a temperatura ambiente sin requerir agentes químicos tóxicos (Dolatabad, 2026).

El método de extrusión por goteo es la técnica más utilizada para fabricar microesferas de alginato cargadas con células microbianas, debido a su simplicidad operativa, bajo costo, escalabilidad y, fundamentalmente, condiciones de procesamiento suaves que preservan la integridad celular. El proceso consiste en la adición gota a gota de una suspensión de alginato-microorganismos en una solución de cloruro de calcio, donde se forman instantáneamente esferas gelificadas que atrapan las células en su interior. Estudios demuestran que este método permite mantener tasas de viabilidad celular superiores al 80-90% inmediatamente después de la encapsulación, y superiores al 70-85% después de 6 meses de almacenamiento bajo condiciones óptimas, manteniendo densidades de 10^7-10^8 UFC/g (Dolatabad, 2026; Young et al., 2006).

4. Óxido de Grafeno como Nanomaterial Funcional en Bioformulaciones

El óxido de grafeno (OG) es un nanomaterial derivado de la oxidación química controlada del grafito, caracterizado por una red hexagonal de átomos de carbono densamente funcionalizada con grupos oxigenados: carboxilo (Anguiano, 2025; Lopes et al., 2021).

Estas funcionalidades confieren al OG propiedades únicas: (i) alta hidrofilicidad que permite su dispersión estable en agua; (ii) elevada área superficial específica; (iii) capacidad de adsorción excepcional de moléculas orgánicas, iones y biomoléculas; y (iv) biocompatibilidad modulable dependiendo de tamaño, concentración y grado de oxidación (Liu et al., 2023; Lopes et al., 2021).

La incorporación de OG en matrices de alginato para encapsulación de MPCV representa una estrategia innovadora con beneficios potenciales: (i) refuerzo estructural de las cápsulas mediante interacciones físicas entre grupos funcionales del OG y cadenas de alginato; (ii) mejora de la retención de agua en las matrices; (iii) modulación optimizada de la permeabilidad, favoreciendo intercambio de gases, nutrientes y metabolitos; (iv) adsorción y liberación controlada de nutrientes y metabolitos microbianos; y (v) potencial efecto estimulador directo del crecimiento vegetal mediante mejora de conductividad eléctrica del suelo y facilidad para el transporte de nutrientes (Liu et al., 2023). Sin embargo, es fundamental optimizar las concentraciones de OG para maximizar beneficios sin generar efectos adversos sobre los MPCV encapsulados o el ecosistema del suelo.

5. Justificación de la Estrategia de Encapsulación Multifuncional

La estrategia de encapsulación de consorcios microbianos multiespecies en matrices de alginato enriquecidas con óxido de grafeno integra múltiples avances biotecnológicos para abordar las limitaciones de los bioinoculantes convencionales. Combina: (i) la complementariedad funcional del consorcio microbiano (*B. subtilis* + *P. fluorescens* + *T. harzianum*) que amplía el espectro de mecanismos de promoción del crecimiento y biocontrol; (ii) la protección física y química proporcionada por la encapsulación en alginato con osmoprotectores que preserva la viabilidad microbiana durante almacenamiento prolongado; y (iii) las propiedades funcionales innovadoras del óxido de grafeno que mejora la integridad de las cápsulas, optimiza la liberación controlada, y potencia la interacción entre los MPCV encapsulados y la rizosfera.

A pesar de los avances en encapsulación y nanomateriales, el potencial sinérgico específico de esta combinación multifuncional sobre la germinación y desarrollo temprano de jitomate permanece sin explorar completamente, representando un vacío importante en la literatura científica.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Experimentación

Se realizó una experimentación considerando: (i) especie microbiana (*Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma harzianum*), (ii) presencia de óxido de grafeno (con y sin OG), y (iii) tipo de evaluación (viabilidad de microorganismos encapsulados y efecto en germinación de semillas). Cada tratamiento se realizó por triplicado.

2. Activación y cultivo de microorganismos

Cultivo en medio sólido

Para la formulación del bioencapsulado se procedió a realizar una activación de los microorganismos, las bacterias *P*. *fluorescens* y *B*. *Subtilis*, se cultivaron en agar y peptona (Bioxon) sin y con oxido de grafeno (1 ppm) en placas Petri por triplicado, fueron incubadas a 30 ± 1 °C durante 24 horas. La pureza del cultivo se verificó mediante tinción de Gram. El hongo *T. harzianum* se cultivó sobre agar de papa dextrosa (PDA; Bioxon) con y sin oxido de grafeno, en placas Petri por triplicado. Para promover el desarrollo de conidios, los cultivos fúngicos se incubaron durante cuatro días a una temperatura controlada de 27 ± 1 °C, permitiendo una esporulación óptima. Tras este periodo de incubación, se toma una muestra con el asa bacteriológica para observación directa en microscopio de los conidios.

Cultivo en medio líquido

Para cultivos líquidos se utilizó caldo nutritivo (MCD LAB; pH 7,2 ± 0,2) sin y con oxido de grafeno (1 ppm), previamente estéril (120°C; 15 min). Se inoculó en tubos de ensayo de 50 mL de caldo nutritivo, una colonia de bacterias *P. fluorescens* y *B. Subtilis*, para *T. harzianum* se tomó una muestra con el asa bacteriológica, de acuerdo con los tratamientos. Posteriormente se incubaron a 30 ± 1 °C para favorecer el crecimiento microbiano.

3. Evaluación de la Cinética de Crecimiento Mediante Densidad Óptica (DO)

Se determinó la cinética de crecimiento microbiano midiendo la absorbancia a 600 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Jenway 6715 UV/Vis) a intervalos de tiempo definidos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 24, 26, 48 y 49 horas post-inoculación.

Antes de cada lectura, se realizó una dilución 1:5 del cultivo en agua destilada estéril para asegurar que las lecturas se encontraran dentro del rango lineal del espectrofotómetro (0.1-0.9 de absorbancia). El espectrofotómetro se calibró a 600 nm utilizando agua destilada estéril como blanco antes de cada series de mediciones. Los datos de cinética de crecimiento se utilizaron para determinar la fase de crecimiento óptima para la encapsulación (fase estacionaria temprana).

4. Encapsulación de microorganismos

Se procedió con la preparación de una solución de alginato sódico al 2% (p/v) disolviendo 2 g de polímero en 100 mL de agua destilada bajo agitación magnética (300 rpm, 30 min, 25 ± 2 °C). Para la encapsulación bacteriana, las células de *P*. *fluorescens* y *B*. *subtilis* se mezclaron con la matriz de alginato (relación 1:10 v/v), mientras que los conidios de *T*. *harzianum* se incorporaron y homogeneizaron de forma similar (200 rpm, 10 min). Las suspensiones de alginato microbiano se extruyeron gota a gota usando una jeringa de 5 mL a una velocidad aproximada de 10 mL/min en una solución de 100 mM (11.1 g) $CaCl_2$, donde se formaron perlas de 2 a 3 mm y se dejaron polimerizar durante 30 minutos. Las perlas se lavaron tres veces con agua estéril.

5. Evaluación del Efecto de las Cápsulas en la Germinación de Semillas de Jitomate

Para evaluar la bioencapsulación y su efecto en la germinación se utilizaron semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum L*.). Se inocularon 20 microcápsulas por cavidad (cápsulas control sin OG o

cápsulas con OG) colocándolas directamente sobre el sustrato estéril. Inmediatamente después, se depositó una semilla de jitomate desinfectada en cada cavidad y se cubrió suavemente con 1-2 cm de peat moss adicional. Tras la germinación se evaluó la altura de la planta y longitud de la raíz.

RESULTADOS

Identificación microscópica de microorganismos

Características Morfológicas de *Trichoderma harzianum:* La observación microscópica del cultivo fúngico de *Trichoderma harzianum* en agar de papa dextrosa (PDA), después de 4 días de incubación a 27°C, reveló abundante producción de conidio (Figura 1A) con una morfología de conidios en estructuras esféricas a levemente ovoides, una coloración en los Hialinos ligeramente verdosos en masa con una superficie lisa, con doble contorno en la mayoría de los conidios, característico de pared celular fúngica. Una disposición de conidios aislados y organizados en pequeños grupos, el desarrollo del cultivo se presentó sin evidencia de contaminación fúngica o bacteriana. En el cultivo en agar PDA se observó, además abundante conidiación sobre las hifas aéreas, indicando condiciones óptimas de esporulación una ausencia de clamidosporas u otras estructuras de resistencia. Estas características morfológicas son completamente consistentes con la identificación de *Trichoderma harzianum*, ampliamente utilizado como agente de biocontrol.

Características Morfológicas de *Bacillus subtilis:* La observación microscópica del cultivo de *Bacillus subtilis* mediante tinción de gram (Figura 1B) reveló células bacterianas con las siguientes características: tinción Gram-positiva con coloración púrpura/violeta intensa una morfología celular tipo bacilar (forma de bastón recto) con una disposición celular predominantemente en cadenas largas de 4-10 células con arreglo característico en empalizada, y ocasionalmente células aisladas o en pares, con bordes celulares regulares y bien definidos, en cuanto al desarrollo del cultivo se observó únicamente la morfología esperada sin evidencia de contaminación por otras especies bacterianas. Estas características son completamente consistentes con la identificación de *Bacillus subtilis*, bacteria Gram-positiva, confirmando la autenticidad del cultivo utilizado para la encapsulación.

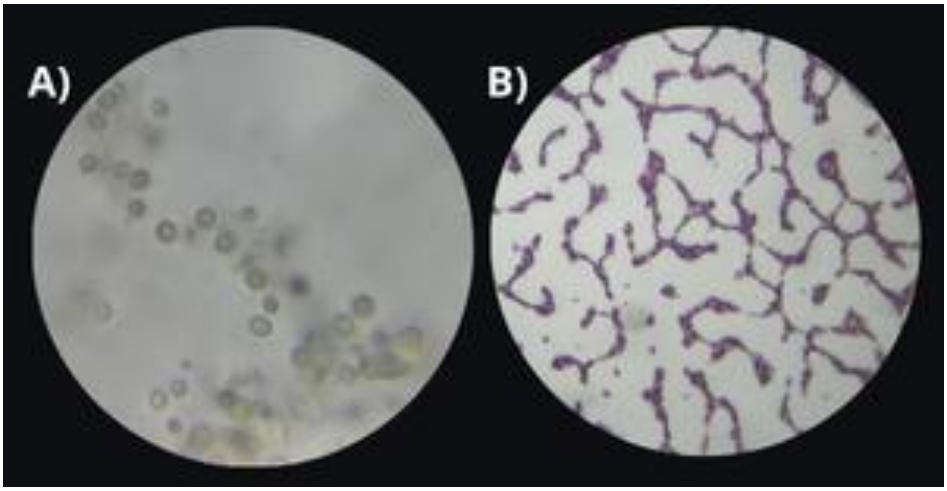


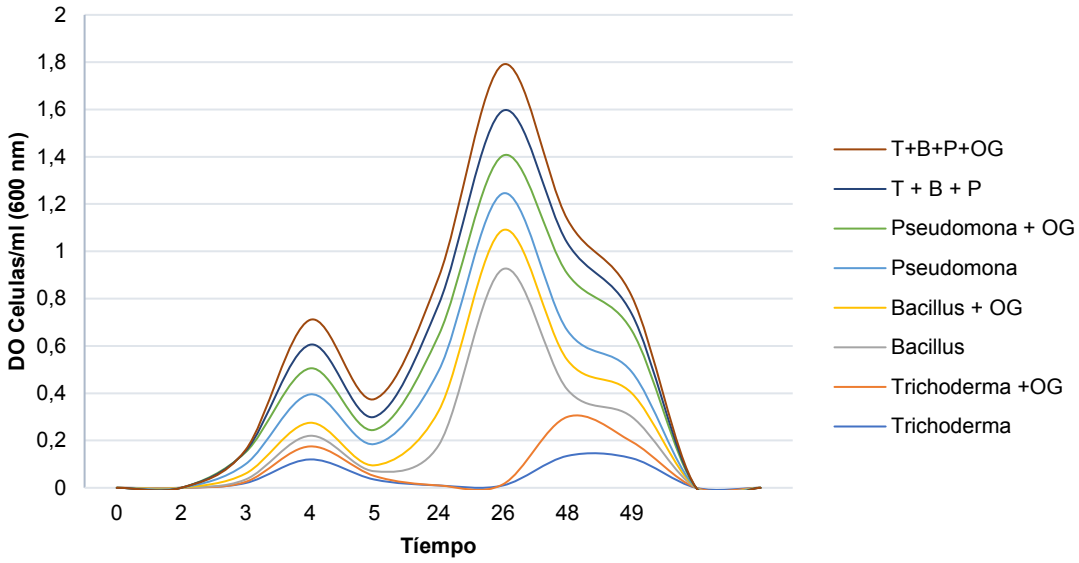
Figura 1. A) Conidios de *Trichoderma harzianum. Se observan estructuras esféricas a ovoides (conidios), dispuestas de manera aislada y en pequeños grupos.;* B) Bacillus subtilis mediante tinción de Gram. Se observan células bacilares Gram-positivas (color púrpura) dispuestas en cadenas largas características de la especie.

Características Morfológicas de *Pseudomonas fluorescens:* La observación microscópica de *Pseudomonas fluorescens* se realizó en cultivo fresco, la tinción de Gram confirmó su naturaleza

Gram-negativa (coloración rosa/rojo), diferenciándola claramente de *B. subtilis*. Las células presentaron una morfología celular Bacilar (ligeramente más delgada que *B. subtilis*) con una disposición celular predominantemente con células aisladas y ocasionalmente en pares o cadenas cortas (2-3 células), en cuanto a movilidad se observó activa en preparaciones en fresco (mediante flagelos polares, aunque no visibles en la tinción estándar), el desarrollo del cultivo se observó sin morfologías contaminantes aparentes. Estas características confirman la identificación como *Pseudomonas fluorescens*, bacteria Gram-negativa aerobia estricta del orden Pseudomonadales.

Cinética de Crecimiento Microbiano Mediante Densidad Óptica

Se evaluó la cinética de crecimiento de los cultivos individuales de *Bacillus subtilis, Pseudomonas fluorescens y Trichoderma harzianum*, así como del consorcio microbiano, bajo dos condiciones: control (sin óxido de grafeno) y con óxido de grafeno (OG), durante 49 horas de incubación, midiendo la absorbancia a 600 nm a los tiempos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 24, 26, 48 y 49 horas. Los resultados se presentan en la Grafica 1.



Grafica 1. Densidad óptica de los tratamientos

Todos los tratamientos evaluados exhibieron un patrón de crecimiento caracterizado por dos picos de absorbancia durante el período de incubación. El primer pico se registró aproximadamente a las 5 horas post-inoculación, correspondiente a una fase de crecimiento exponencial temprano. Posteriormente, se observó un descenso transitorio de la DO_{600} entre las 5-6 horas, seguido de una segunda fase de crecimiento que alcanzó su máximo aproximadamente a las 26 horas post-inoculación en todos los tratamientos. Después de las 26 horas, todos los tratamientos mostraron un pronunciado declive en la DO_{600}, atribuible al agotamiento de nutrientes esenciales en el medio de cultivo, la acumulación de metabolitos inhibitorios y la reducción consiguiente de la biomasa celular viable.

En todos los cultivos individuales, los tratamientos con óxido de grafeno superaron consistentemente a sus respectivos controles sin OG en todos los puntos temporales evaluados, sugiriendo un efecto bioestimulador del nanomaterial sobre el crecimiento microbiano a esta concentración. *Trichoderma harzianum* presentó los valores más bajos de DO_{600} entre los tres microorganismos evaluados de manera individual, tanto en el control (DO máx ≈ 0.15) como en el tratamiento con OG (DO máx ≈ 0.35), lo cual es consistente con la menor tasa de crecimiento intrínseca de los hongos. *Bacillus subtilis* mostró valores intermedios de DO_{600}, alcanzando una DO máxima aproximada de 0.85 (control) y 1.10 (con OG) a las 26 horas, reflejando una tasa de crecimiento moderada consistente

con las características fisiológicas de esta especie Gram-positiva formadora de endosporas. *Pseudomonas fluorescens* fue el microorganismo de mayor crecimiento individual, alcanzando DO máximas de aproximadamente 1.21 (control) y 1.40 (con OG) a las 26 horas, consistente con su reconocida alta tasa de proliferación y versatilidad metabólica (Oteino et al., 2015).

El tratamiento más destacado fue el consorcio microbiano con óxido de grafeno (T+B+P+OG), que alcanzó la DO_{600} máxima de aproximadamente 1.80 a las 26 horas, siendo significativamente superior a todos los demás tratamientos (Grafica 1). El consorcio sin OG alcanzó una DO máxima de aproximadamente 1.60, también superior a los cultivos individuales. Es notable que la DO máxima del consorcio (1.80) fue considerablemente superior a la suma aritmética promedio de los cultivos individuales bajo las mismas condiciones.

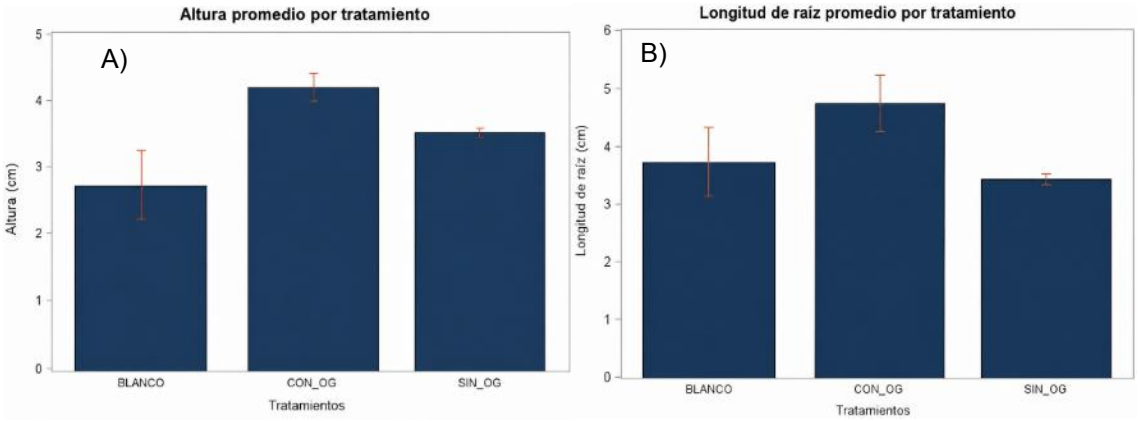
Altura de plántula y longitud de raíz de jitomate

Se evaluó el efecto de los tratamientos de bioencapsulación sobre el crecimiento de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum L.).* Se compararon tres tratamientos: blanco (sustrato sin inocular), sin OG (consorcio microbiano sin nanomaterial) y con OG (consorcio microbiano formulado con óxido de grafeno). Las evaluaciones se realizaron mediante un diseño con tres réplicas independientes (n = 3) por tratamiento, sin embargo, durante la experimentación se murieron algunas plantas y no hubo germinación.

El análisis de varianza (ANOVA, α=0.05) indicó que, debido a la alta variabilidad biológica intrínseca y al tamaño de muestra evaluado, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). Sin embargo, se observaron claras tendencias numéricas y biológicas que sugieren un efecto promotor del consorcio encapsulado, particularmente en presencia del nanomaterial. Para la variable de altura de plántula, el análisis arrojó un valor-p en el límite de la significancia ($p = 0.0930$), evidenciando una fuerte tendencia biológica de promoción de crecimiento. El tratamiento con OG promovió el mayor desarrollo aéreo, alcanzando una altura promedio de 4.15 cm. Esto representa un notable incremento numérico del 53.7% en comparación con el tratamiento blanco, el cual registró el menor desarrollo con 2.70 cm de altura. Por su parte, el tratamiento sin OG presentó una altura intermedia de 3.50 cm, equivalente a un incremento del 29.6% respecto al blanco. La diferencia numérica entre la formulación con y sin óxido de grafeno (4.15 vs 3.50 cm) sugiere un posible efecto sinérgico o bioestimulador adicional atribuible a la incorporación del nanomaterial en la matriz de alginato.

En cuanto al desarrollo radicular, el tratamiento con OG registró nuevamente el mayor valor promedio, alcanzando una longitud de 4.75 cm. Este crecimiento representó un aumento numérico del 28.3% respecto al control blanco (3.70 cm). Es importante destacar que el tratamiento sin OG (consorcio microbiano convencional) presentó una longitud de raíz de 3.45 cm, un valor numéricamente similar (ligeramente inferior) al del blanco. Este comportamiento sugiere que la presencia exclusiva del consorcio microbiano no fue suficiente para potenciar el crecimiento radicular en la etapa evaluada, y que la incorporación de óxido de grafeno fue el factor diferenciador que permitió catalizar la elongación de la raíz principal observada en el tratamiento con OG (Grafica 2).

Los datos consolidados sugieren que, si bien se requieren ensayos con mayor número de réplicas estadísticas para confirmar la significancia matemática, la formulación multifactorial (consorcio + OG) ejerce una tendencia biológica favorable y superior a la bioformulación convencional en el desarrollo temprano del jitomate.



Grafica 2. A) Altura de la planta; B) Longitud de raíz.



Figura 2. A) Blanco; B) Con OG; C) Sin OG

Es importante reconocer las limitaciones metodológicas del presente estudio. En primer lugar, el tamaño de muestra efectivo (n = 2 por tratamiento) derivado de la mortandad natural de algunas plántulas, lo que limitó el análisis estadístico más efectivo, impidiendo detectar diferencias estadísticamente significativas a pesar de que las tendencias biológicas observadas son consistentes y numéricamente relevantes. Estudios futuros deberían incrementar el número de réplicas a un mínimo de n = 5-10 por tratamiento para obtener suficiente poder estadístico. En segundo lugar, el experimento evaluó únicamente el efecto en etapas tempranas de desarrollo (primeras semanas post-siembra), por lo que se desconoce si los beneficios observados se mantienen, amplían o disminuyen en etapas posteriores (floración, fructificación, madurez). Estudios de seguimiento a largo plazo son necesarios para evaluar el impacto sobre el rendimiento final del cultivo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la bioencapsulación de *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma harzianum* en una matriz de alginato de sodio representa una estrategia eficaz para mejorar la viabilidad y el desempeño funcional de estos microorganismos promotores del crecimiento vegetal. La incorporación de óxido de grafeno en la formulación no solo favoreció el crecimiento microbiano en condiciones controladas, sino que también potenció el efecto del consorcio sobre el desarrollo de plántulas de jitomate, reflejado en incrementos significativos en la altura de la planta y la longitud radicular.

De esta manera se sugiere la existencia de un efecto sinérgico entre los microorganismos encapsulados y el nanomaterial, posiblemente asociado a una mejora en la disponibilidad de nutrientes, protección frente a condiciones adversas y una liberación más eficiente de los microorganismos en el entorno de la rizosfera. Asimismo, la técnica de encapsulación por extrusión demostró ser un método viable, accesible y reproducible para la formulación de bioinsumos agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Altomare CNorvell WA, Björkman T, Harman GE. (1999). Solubilization of Phosphates and Micronutrients by the Plant-Growth-Promoting and Biocontrol Fungus Trichoderma harzianum Rifai 1295-22. Appl Environ Microbiol 65. https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999
2. Ali, M., Cybulska, J., Frąc, M., & Zdunek, A. (2023). Application of polysaccharides for the encapsulation of beneficial microorganisms for agricultural purposes: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 244, 125366. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120384
3. Anguiano Hernández A.J (2025). Efecto de nanopartículas de óxido de grafeno dopado con nitrógeno y oxido de grafeno en la germinación y crecimiento de rábano (Raphanus sativus). Centro de Investigaciones biológicas del Noroeste, S.C. https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/3032
4. Bejarano-González, F. (2017). Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A. C.
5. Díaz-Rodríguez, A. M.; Salcedo, L. A.; Felix, C. M.; Parra-Cota, F. I.; Santoyo, G.; Puente, M. L.; Bhattacharya, D.; Mukherjee, J. and De los Santos, V. S. 2021. The current and future role of microbial culture collections in food security worldwide.Front.Sustain.Food Syst.4:614739. Editor(s): Shirish H. Sonawane, Bharat A. Bhanvase, Manickam Sivakumar, Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System, Elsevier, 2020. Pages 131-140. Recuperado en 15 de agosto de 2025, de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128193631000089
6. Dolatabad, H. K. (2026). Formulación multifactorial para microorganismos estables y encapsulados que promueven el crecimiento vegetal. *Scientific Reports, 16*, 4797. https://doi.org/10.1038/s41598-026-35331-w
7. Fathi, F., Saberi-Riseh, R., & Khodaygan, P. (2021). Survivability and controlled release of alginate-microencapsulated *Pseudomonas fluorescens* VUPF506 and their effects on biocontrol of *Rhizoctonia solani* on potato. *International Journal of Biological Macromolecules, 183*, 627–634. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.159
8. Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. Scientifica. https://doi.org/10.6064/2012/963401
9. Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology, 2(1), 43–56. https://doi.org/10.1038/nrmicro797
10. He, Y., Wu, Z., Tu, L., Han, Y., Zhang, G., & Li, C. (2015). Encapsulation and characterization of slow-release microbial fertilizer from the composites of bentonite and alginate. *Applied Clay Science, 109–110*, 68–75. https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.001
11. Hernández Mendoza, J. L., Hinojosa-López, P. L., Salazar Bravo, Á., García Olivares, J. G., Rodríguez Castillejos, G. C., & Quiroz Velásquez, J. D. (2018). Conservación por microencapsulación de bacterias de uso agrícola: Azospirillum Brasilense. Revista Boliviana de Química, 35(4), 117-122 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362010000300009&lng=es&tlng=es
12. Ibarra Villarreal, A.; Gándara Ledezma, A.; Godoy-Flores, A.; Díaz-Rodríguez, A. M.; Parra-Cota, F. I. and De los Santos, V.S. 2021. Salt-tolerant bacillus species as a promising strategy to mitigate the salinity stress in wheat (Triticum turgidum subsp. durum). J. AridEnviron. 186:104399.

13. Liu, Z., Zhou, M., Liao, W., Liu, J., Luo, C., Lu, C., ... & Zhu, H. (2023). Fertilizer-holding performance of graphene on soil colloids based on double electric layer theory. Materials, 16(7), 2578.
14. Lopes, T., Cruz, C., Cardoso, P., Pinto, R., Marques, P. A. A. P., & Figueira, E. (2021). A multifactorial approach to disentangle the effects of graphene oxide nanosheets (GO) on plants: Plant growth-promoting bacteria inoculation, bacterial survival, and drought. *Nanomaterials, 11*(3), 771. https://doi.org/10.3390/nano11030771
15. Navas Pinto, W., Cree, D. E., Wilson, L. D., Barrionuevo, G. O., Sánchez-Sánchez, X., & Calvopiña, H. (2025). Caracterización de óxido de grafeno sintetizado mediante un método de Hummers modificado. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, 34*, 31–42. https://doi.org/10.17163/ings.n34.2025.03
16. Oteino, N., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K. J., & Dowling, D. N. (2015). Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic Pseudomonas isolates. Frontiers in Microbiology, 6, Artículo 745. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00745
17. Park, J. K., & Chang, H. N. (2000). Microencapsulation of microbial cells. *Biotechnology Advances, 18*(4), 303–319. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00040-9
18. Riseh, R. S., Hassanisaadi, M., Vatankhah, M., & Kennedy, J. F. (2023). Encapsulating biocontrol bacteria with starch as a safe and edible biopolymer to alleviate plant diseases: A review. Carbohydrate Polymers, 302, 120384.
19. Saberi-Riseh, R., Moradi-Pour, M., Mohammadinejad, R., & Thakur, V. K. (2021). Biopolymers for Biological Control of Plant Pathogens: Advances in Microencapsulation of Beneficial Microorganisms. Polymers, 13(12), 1938. https://doi.org/10.3390/polym13121938
20. SIAP, Consultado el 14 de agosto de 2025. Extraído de https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.
21. Subercaseaux-Ugarte, D., Díaz-Guerrero, T., Ortiz-Salgado, D. A., Méndez-Lemus, Y., & González-Esquivel, C. E. (2025). Sostenibilidad de los sistemas hortícolas periurbanos y a pequeña escala en el centro de México. Revista Internacional de Sostenibilidad Agrícola, 23(1). https://doi.org/10.1080/14735903.2025.2599669
22. Upadhayay, V. K., Chitara, M. K., Mishra, D., Jha, M. N., Jaiswal, A., Kumari, G., et al. (2023). Synergistic impact of nanomaterials and plant probiotics in agriculture: A tale of two-way strategy for long-term sustainability. *Frontiers in Microbiology, 14*, Article 1133968. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1133968
23. Young, C. C., Rekha, P. D., Lai, W. A., & Arun, A. B. (2006). Encapsulation of plant growth-promoting bacteria in alginate beads enriched with humic acid. Biotechnology and bioengineering, 95(1), 76-83.

EFECTO DE LA ACLIMATIZACIÓN DE PLÁNTULAS OBTENIDAS POR MULTIPLICACIÓN IN VITRO EN VARIEDADES DE CAÑA

Jericó Jabín Bello-Bello[1], Eucario Mancilla-Álvarez[2], María Angélica Fuentes-Torres[2], Amelia López-Herrera[3], Fernando Carlos Gómez-Merino[3]*

[1]SECIHTI-Colegio de Postgraduados Campus Cordoba. [2]Colegio de Posgraduados Campus Córdoba. Carretera Córdoba-Veracruz km 348, Manuel León, Amatlán de los Reyes,. [2]Colegio de Posgraduados Campus Córdoba.
fernandg@colpos.mx

RESUMEN

En México, la industria azucarera es uno de los principales motores económicos con relevancia social y productiva; en 2024 el país se ubicó como el sexto productor mundial de caña de azúcar. Debido a su importancia, la caña constituye un recurso genético vegetal estratégico. El estudio evaluó la supervivencia durante la aclimatización de plántulas obtenidas por multiplicación in vitro en diez variedades de caña (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341). Se utilizaron 100 plántulas por variedad, con una longitud de 6-8 cm, las cuales se establecieron en un sustrato con composta, turba y agrolita en bandejas de polipropileno. Las plántulas se mantuvieron en invernadero con 60% de sombra, 28 ± 2 °C, humedad relativa de 70 ± 15% y luz natural. Después de ocho semanas de aclimatización, se evaluó el porcentaje de supervivencia por variedad. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron que las plántulas tuvieron un adecuado crecimiento durante la fase de aclimatización en invernadero, y los porcentajes de supervivencia se mantuvieron altos en todas las variedades evaluadas. Se concluye que las plántulas de caña obtenidas por cultivo in vitro, de todas las variedades, presentan una alta supervivencia durante el proceso de aclimatización, lo que demuestra la eficiencia del sistema de micropropagación.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo que predomina en regiones tropicales y subtropicales del mundo (Tripathi *et al*., 2022). Su importancia a nivel global radica en el valor económico derivado de la producción de sacarosa, coproductos y subproductos utilizados en las industrias alimentaria, energética y farmacéutica (Aguilar-Rivera, 2022; Sheshdeh *et al*., 2024). Este cultivo representa un papel fundamental en el panorama agrícola y económico de México, aportando significativamente a la generación de empleo en las regiones rurales (Ortega-Díaz et al., 2025). Para el año 2023, esta agroindustria alcanzó una producción de 55.58 millones de toneladas, posicionando a México como el octavo productor mundial de caña de azúcar, aportando el 2.6% de la producción mundial total (SADER, 2024; CONADUSECA, 2023). La producción de este cultivo se lleva a cabo en 16 estados, abarcando 290 municipios que abastecen a 47 ingenios azucareros (DOF, 2026). En 2024, la caña de azúcar se consolidó como el tercer cultivo de mayor importancia en el país, por debajo del aguacate y el maíz. (FIRA, 2025)

No obstante, la caña presenta desafíos en cuanto a su productividad y competitividad. Además, se ve gravemente afectada por la mezcla de cultivares en una misma área de cultivo, la propagación de plagas y enfermedades, el envejecimiento de las plantaciones y falta de técnicas eficientes de propagación (Yadav *et al*., 2020). La biotecnología es una de las alternativas para resolver estos problemas, ofreciendo técnicas de cultivo de tejidos vegetales que permiten propagar, conservar y manipular cualquier tipo de material vegetal en condiciones artificiales, controladas y asépticas (Chowdhury *et al*., 2025).

La aclimatización es la etapa final de la micropropagación, en la que se lleva a cabo la transferencia de plántulas *in vitro* a condiciones externas y el inicio de su crecimiento *ex vitro* (Gómez-Kosky *et al*., 2020). En consecuencia, la aclimatización puede ocasionar una mortalidad significativa debido a los factores de estrés biótico y abiótico del medio externo, como lo son las altas temperaturas, la elevada intensidad lumínica, la baja humedad relativa y la presencia de patógenos (Chandra et al., 2010; Kumar y Rao, 2012). Por ello, es fundamental asegurar una transición gradual de las condiciones de crecimiento para las plantas durante la aclimatización con el fin de reducir el estrés. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la tasa de supervivencia de plántulas obtenidas por multiplicación in vitro a la aclimatización bajo invernadero de 10 variedades de caña (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341).

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal

Se utilizaron 10 variedades de caña de azúcar (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341) obtenidas mediante multiplicación *in vitro*. Los brotes se encontraban en un medio MS suplementado con sacarosa, kinetina (KIN, Merck KGaA®), ácido indolacético (IAA, Merck KGaA®) y 6-bencilaminopurina (BAP, PhytoTech Labs, Lenexa, KS, EE. UU.), de acuerdo con lo descrito por Martínez-Estrada *et al.* (2017). Para el establecimiento, se emplearon 100 plantas de cada variedad, con más de cuatro brotes y una longitud de 5 a 8 cm. Se sembraron en charolas de polipropileno con una mezcla de sustrato compuesta por compost, turba y agrolita (2:1:1). Las plántulas se mantuvieron en un invernadero con un 60% de sombra, a 28 ± 2 °C, humedad relativa del 70 ± 15% y luz natural.

Variable evaluada

Se evaluó la tasa de supervivencia durante la aclimatización de plántulas de caña de azúcar obtenidas mediante multiplicación in vitro de 10 variedades (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341). La evaluación se realizó tras ocho semanas de permanencia en invernadero.

Diseño experimental

Se siguió un diseño completamente al azar con tres repeticiones y se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Los datos se procesaron con el paquete estadístico SPSS® V. 22 para Windows**.**

RESULTADOS

La tasa de supervivencia de las plántulas no difirió entre las diferentes variedades de cañas cultivadas. El promedio de supervivencia se situó en el 97% (Figura 1).

La aclimatación es la etapa de mayor importancia en el proceso de micropropagación; esta fase requiere de condiciones de manejo adecuadas para que pueda ser exitosa (Rangel-Estrada *et al*., 2017). Las 10 variedades de caña (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341) presentaron una alta tasa de supervivencia, con rangos de entre un 96 y 98%. Las condiciones proporcionadas en invernadero de humedad (70 ± 15%), temperatura (28 ± 2 °C) y sombreado (60%) fueron las adecuadas para una transición de condiciones in vitro a ex vitro. De acuerdo con Pospíšilová *et al.* (2007)**, l**as plántulas requieren cierto tiempo para corregir las anormalidades inducidas *in vitro* y aclimatarse a condiciones autotróficas, asimismo, la regulación del crecimiento bajo condiciones controladas de iluminación y una reducción gradual de humedad son indispensables para el establecimiento exitoso.

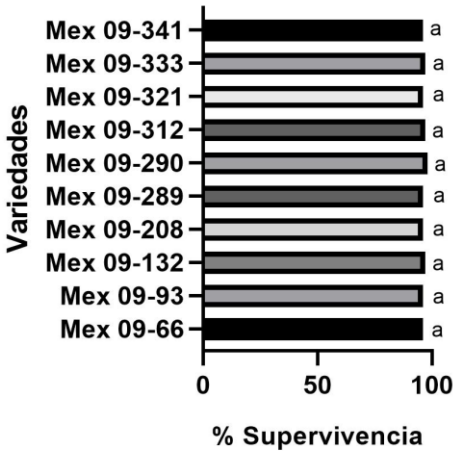


Figura 1. Porcentaje de supervivencia a la aclimatización de plántulas obtenidas por multiplicación *in vitro*. Letras diferentes sobre la barra indican diferencias estadísticamente significativas (P ≤ 0.05)

Además, el adecuado desarrollo de los brotes, durante la fase de multiplicación *in vitro* pudo contribuir a la alta tasa de supervivencia en la aclimatización. La composición del medio de cultivo empleado y su suplementación probablemente favorecieron la formación, crecimiento y desarrollo de los brotes obtenidos *in vitro*. En este sentido, Grzelak *et al*. (2024) señalan que, para incrementar la eficiencia de la aclimatización, se ha recurrido al uso de diversas sustancias y compuestos que generan efectos positivos sobre los procesos fisiológicos de las plantas y, en consecuencia, mejoran su estado general y su supervivencia durante la fase *in vitro* como durante la aclimatización.

CONCLUSIONES

Las plántulas de las 10 variedades de caña de azúcar (Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333 y Mex 09-341), no presentaron diferencias significativas en la tasa de supervivencia durante la aclimatización, obteniendo valores superiores al 96%. Los resultados obtenidos indican que las condiciones de manejo durante la aclimatización fueron adecuadas para todas las variedades evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ortega-Díaz, M. Flores-Segovia, N. Aguilar-Rivera, “Stochastic frontier analysis and agricultural typologies: Applied to Mexico’s sugarcane industry”, Reg. Sci. Policy Pract., Vol. 17, 2025, Art. 100173.
2. CONADUSECA, “Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar: 9° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México Zafras 2012-2013 / 2021-2022”. Consultado en: https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/9-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es
3. DOF, “Diario Oficial de la Federación: Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2026-2030”. Consultado en línea el 25 de mayo de 2026: de https://sidof.segob.gob.mx/notas/5787689
4. E. Martínez-Estrada, J. H. Caamal-Velázquez, J. Salinas-Ruíz, J. J. Bello-Bello, “Assessment of somaclonal variation during sugarcane micropropagation in temporary immersion bioreactors by intersimple sequence repeat (ISSR) markers”, In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant, Vol. 53, No. 6, 2017, pp. 553-560.
5. FIRA “Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura: Panorama agroalimentario 2025, Azúcar”. Consultado en línea: https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=133523

6. J. Pospíšilová, H. Synková, D. Haisel, Š. Semorádová, “Acclimation of plantlets to ex vitro conditions: Effects of air humidity, irradiance, CO_2 concentration and abscisic acid (ABA)”, Acta Hortic., Vol. 748, 2007, pp. 29-38.
7. K. Kumar, I. U. Rao, “Morphophysiological problems in acclimatization of micropropagated plants in ex vitro conditions—a review”, J. Ornam. Hortic. Plants, Vol. 2, No. 4, 2012, pp. 271–283.
8. M. Grzelak, A. Pacholczak, K. Nowakowska, “Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants”, Plant Cell Tissue Organ Cult., Vol. 159, 2024, 72.
9. N. Aguilar-Rivera, “Bioindicadores para la sostenibilidad de la agroindustria azucarera”, Sugar Tech., Vol. 24, 2022, pp. 651–661.
10. P. Tripathi, A. Chandra, J. Prakash, “Changes in physio-biochemical attributes and dry matter accumulation vis a vis analysis of genes during drought and stress recovery at tillering stage of sugarcane”, Acta Physiol. Plant., Vol. 44, 2022, 7.
11. R. Gómez-Kosky, D. N. Jaramillo, C. R. Esquiro, B. A. Villegas, M. B. Calimano, P. M. Armas, J. A. Ferreiro, E. Pineda, B. Kukurtcu, D. D. Daniels, “Efecto de VIUSID Agro® y FitoMas-E® en la aclimatación ex vitro de plantas de caña de azúcar (Saccharum spp.) cultivar C90-469”, Sugar Tech., Vol. 22, No. 1, 2020, pp. 42-51.
12. R. M. Chowdhury, M. Mehmet, J. Mukherjee, A. J. Debnath, K. Ražná, “Chitosan as an elicitor in plant tissue cultures: Methodological challenges”, Molecules, Vol. 30, No. 17, 2025, Art. 3476.
13. S. Chandra, R. Bandopadhyay, V. Kumar, R. Chandra, “Acclimatization of tissue cultured plantlets: from laboratory to land”, Biotechnol. Lett., Vol. 32, No. 9, 2010, pp. 1199-1205.
14. S. E. Rangel-Estrada, E. Hernández-Meneses, M. Hernández-Arenas, “Micropropagación de variedades de caña de azúcar cultivadas en México”, Rev. Fitotec. Mex., Vol. 39, No. 3, 2016, pp. 225-231.
15. S. Sheshdeh, M. R. Sabour, F. Mohammadi, J. Hui, M. Birkved, B. Khoshnevisan, “Early environmental sustainability guidance on supercritical water gasification technologies for sugarcane bagasse management”, Sustain. Prod. Consum., Vol. 44, 2024, pp. 312-329.
16. S. Yadav, P. Jackson, X. Wei, E. M. Ross, K. Aitken, E. Deomano, F. Atkin, B. J. Hayes, K. P. Voss-Fels, “Accelerating genetic gain in sugarcane breeding using genomic selection”, Agronomy, Vol. 10, No. 4, 2020, 585.
17. SADER, “Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: Boletín Informativo de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural agosto 2024”. Consultado en: https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/la-industria-de-la-cana-de-azucar-pilar-del-desarrollo-productivo-en-mexico#:~:text=La%20industria%20de%20la%20ca%C3%B1a%20de%20az%C3%BAcar%20se,como%20el%20octavo%20mayor%20productor%20a%20nivel%20mundial

MADURACIÓN *IN VITRO* DE OVOCITOS DE GATA SEGÚN LA EDAD DE LA HEMBRA

Silvana García Chávez [1], José Roberto Vázquez Avendaño [2], Juan Manuel Quezadas Fuentes [2], Alfredo Trejo Córdova [2], Demetrio Alonso Ambriz García [2] y María del Carmen Navarro Maldonado.

[1] Licenciatura en Biología [2] Departamento de Biología de la Reproducción, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana
cbs2212020170@izt.uam.mx

RESUMEN

Los felinos silvestres están bajo amenaza de extinción, debido en gran parte a las actividades antrópicas de competencia por el hábitat y las presas que los sustentan. En contraparte, los felinos domésticos (*Felis catus*) han tenido un crecimiento poblacional importante y en algunos casos, por limitaciones en su tutoría, pronto acceden a ser ferales, por lo que la esterilización quirúrgica es un método frecuente para su control en las campañas de las alcaldías de la Ciudad de México. Con el propósito de avanzar en el conocimiento de las técnicas de reproducción asistida en felinos domésticos, para extrapolarlas a la conservación de felinos silvestres, el objetivo de este trabajo fue evaluar la maduración *in vitro* (MIV) de ovocitos de gatas domésticas según la edad de las hembras, para lo cual se diseñaron dos grupos de tratamiento: Gatas jóvenes de menos de 6 meses de edad (<6M) y gatas adultas de más de 6 meses (>6M). Durante los meses de junio a noviembre de 2025, se colectaron ovarios de gatas esterilizadas en la Clínica Veterinaria de la Alcaldía Iztapalapa, que se trasladaron al Laboratorio de Reproducción Animal Asistida de la UAM Iztapalapa durante 30 min. Se obtuvieron los ovocitos mediante cortes seriados, y se maduraron en TCM-199 suplementado con hormonas y SFB durante 36 h, a 38.5°C y 5% de CO_2 en humedad a saturación. Posteriormente, los ovocitos se tiñeron con DAPI para determinar bajo microscopio de fluorescencia la tasa de MIV, por la presencia del primer cuerpo polar y la placa metafásica. Los resultados mostraron que las gatas jóvenes de <6M, con incipiente actividad hormonal sexual, tuvieron la mitad de los ovocitos que las adultas, maduras sexualmente de >6M (9.8±3.5 vs 17.4±9.5, $p<0.05$) y que los ovocitos de las jóvenes <6M, tuvieron una menor respuesta al someterlos a la MIV en comparación con las adultas (42.1%±17.2 vs. 60.3%±14.7, $p<0.05$). Es importante recordar que esta especie es de ovulación refleja por lo que la madurez sexual de la hembra provee a los ovocitos las mejores condiciones para su propia madurez y, en su caso, fecundación y desarrollo embrionario. Se concluye que para la estandarización de la MIV, así como de otras técnicas de reproducción asistida, resulta mejor utilizar ovocitos de gatas maduras de >6M de edad y esto también debe de considerarse cuando, en su momento, se trate de hembras felinas de especies silvestres.

TEORIA

Los felinos silvestres están bajo amenaza de extinción, debido en gran parte a las actividades antrópicas de competencia por el hábitat y las presas que los sustentan (Herrera *et al*., 2018). En contraparte, los felinos domésticos (*Felis catus*) han tenido un crecimiento poblacional importante y en algunos casos, por limitaciones en su tutoría, pronto acceden a ser ferales, por lo que la esterilización quirúrgica es un método frecuente para su control en las campañas de las alcaldías de la Ciudad de México.

Por otro lado, el desarrollo de las biotecnologías reproductivas ha adquirido gran relevancia tanto en medicina veterinaria como en programas de conservación de especies silvestres. Entre estas herramientas, la maduración *in vitro* (MIV) de ovocitos constituye una de las técnicas más elementales e importantes debido a su aplicación en la producción *in vitro* de embriones por fertilización *in vitro* o clonación. Estas técnicas han sido ampliamente utilizadas en especies domésticas de interés zootécnico tales como bovinos, ovinos, caprinos y porcinos, entre otras. En el

caso de los felinos, el gato doméstico (*Felis catus*) es empleado como modelo experimental para el estudio de la fisiología reproductiva y para el desarrollo de protocolos aplicables a felinos silvestres amenazados como el jaguar (*Panthera onca*), el ocelote (*Leopardus pardalis*), el trigrillo (*Leopardus wiedii*), el jaguarundi (*Herpailurus yagouaroundi*), el puma (*Puma concolor*) y el gato montés (*Lynx rufus*) (Herrera *et al*., 2018).

La MIV consiste en la capacidad de los ovocitos para reanudar la meiosis y alcanzar tanto la maduración citoplasmática como la nuclear en la metafase II, en donde el ovocito quedará nuevamente arrestado hasta su fertilización por el espermatozoide. Durante este proceso ocurren cambios bioquímicos, estructurales y moleculares que permiten la correcta progresión de la meiosis y el desarrollo embrionario temprano (Baldini *et al*., 2024). Sin embargo, las tasas de éxito de la MIV en felinos suelen ser menores en comparación con otras especies domésticas, ya que diversos factores afectan la calidad ovocitaria y la capacidad de maduración (Van Soom *et al*., 2014).

Entre estos factores que influyen en la eficiencia de la MIV se encuentran la calidad de los complejos cúmulo-ovocito (COC), el estado fisiológico de la hembra, la etapa del ciclo estral, el tiempo de incubación y la edad de la donadora. La edad es importante debido a que está relacionada con el grado de desarrollo folicular y con la acumulación de factores citoplasmáticos esenciales para la competencia meiótica y el desarrollo embrionario (Młodawska *et al*., 2024).

La pubertad de las gatas se presenta entre los 6 y 12 meses de edad, cuando alcanzan un peso entre 2 y 3 kg. El inicio de la pubertad dependerá también de otros factores, como la estación del año y variaciones raciales, tales como que aquellas razas con pelo corto entrarán en la pubertad antes que las razas de pelo largo. Así como también aquellas razas pequeñas alcanzarán la pubertad antes que las razas más grandes (Johnson, 2022). Debido a que los ovarios se obtienen de las ovariohisterectomías realizadas en las campañas de esterilización, existe una gran variación de las condiciones fisiológicas de las hembras que llegan a consulta y que afectan la MIV.

El estudio de los factores que afectan la maduración ovocitaria en felinos resulta esencial para optimizar las técnicas de reproducción asistida y mejorar la eficiencia de los protocolos utilizados en especies domésticas y silvestres.

Por lo anterior y, con el propósito de avanzar en el conocimiento de las técnicas de reproducción asistida en felinos domésticos para extrapolarlas a la conservación de felinos silvestres; el objetivo del presente trabajo fue evaluar la maduración *in vitro* de ovocitos de gatas domésticas según la edad de las hembras donadoras, comparando ovocitos provenientes de gatas jóvenes menores de 6 meses y gatas adultas de más de 6 meses.

MÉTODO

Obtención y transporte de ovarios.

Durante los meses de junio a noviembre de 2025, se colectaron ovarios de gatas esterilizadas mediante ovariohisterectomía, en las jornadas de esterilización de la Clínica Veterinaria de la Alcaldía Iztapalapa en la Ciudad de México, México. Los ovarios fueron colocados en solución salina fisiológica (0.9% NaCl) suplementada con antibióticos (penicilina-gentamicina) y transportados al laboratorio a temperatura ambiente para su procesamiento. Se diseñaron dos grupos de tratamiento: Gatas jóvenes de menos de 6 meses de edad (<6M) y gatas adultas de más de 6 meses (>6M).

Recuperación y selección de ovocitos.

La obtención de los COC se realizó mediante slicing. Tras hacer los cortes, los ovarios se lavaron en TCM-199 con HEPES suplementado con heparina. Posteriormente, se colectaron los COC bajo microscopio estereoscópico y se clasificaron de acuerdo con su morfología y el número de capas de células de la granulosa que los rodeaban.

Se seleccionaron únicamente ovocitos de calidad I y II, caracterizados por presentar un citoplasma homogéneo y varias capas compactas de células del cúmulo (Wood y Wildt, 1997). Los ovocitos con signos de degeneración o con cúmulo incompleto fueron descartados.

Maduración *in vitro*.
Los COC seleccionados fueron colocados en 500 μL de medio de maduración (TCM-199, 0.3% BSA-Fracción V, 0.36 mM piruvato, 2.0 mM glutamina, 10 ng/mL EGF, 50 μg/mL gentamicina, 1 μg/mL 17-B estradiol, 2.2 mM lactato de calcio y 0.1 UI FSH-LH a 38 °C y 5% de CO_2 en aire durante 36 horas (Veraguas *et al.,* 2018).

Evaluación del estado meiótico.
Una vez concluido el periodo de cultivo los COC fueron colocados en un tubo Eppendorf con 500 μL de hialuronidasa 0.5 mg/mL a 38 °C, y se realizó pipeteo suave para desprender las células del cúmulo del ovocito. Posteriormente, los ovocitos se lavaron en TCM-199 suplementado con 2% de SFB para inactivar la hialuronidasa y eliminar las células del cúmulo restantes.

Los ovocitos fueron fijados con paraformaldehído al 4% y montados en portaobjetos con DAPI y medio de montaje (Entellan®). La evaluación del estado meiótico se realizó mediante microscopía de epifluorescencia.

Análisis de resultados.
Los resultados se expresaron como porcentaje de ovocitos en cada estado meiótico respecto al total de ovocitos evaluados en cada grupo experimental. Se aplicó una prueba t de Student para evaluar los diferentes estados meióticos entre los dos grupos de gatas.

RESULTADOS

En el presente estudio se evaluó la capacidad de MIV de ovocitos provenientes de gatas domésticas en diferentes edades (menores a 6 meses o mayores a 6 meses). Los resultados mostraron diferencias entre los grupos experimentales en cuanto a la proporción de ovocitos que alcanzaron la metafase II después de 36 horas de cultivo (Figura 1).

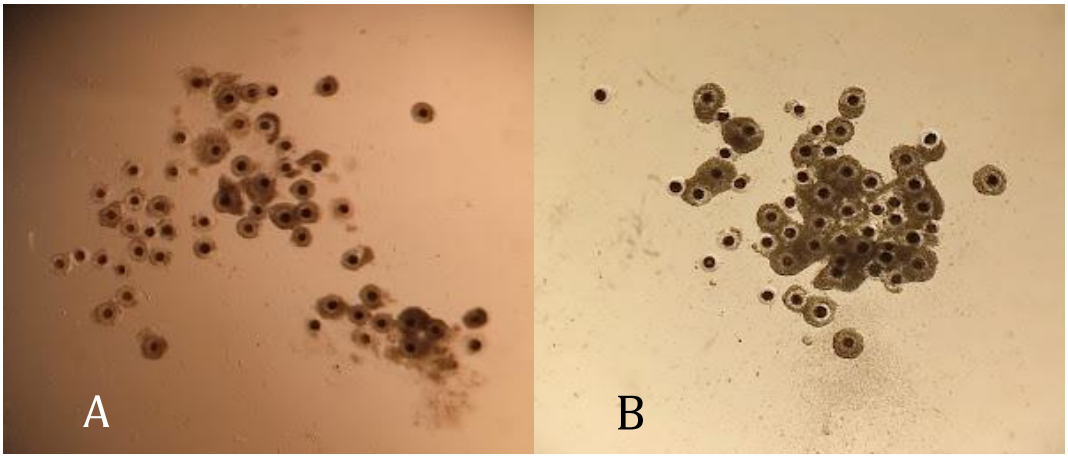


Fig. 1. A. Complejos cúmulo ovocitos (COC) de gata calidad I y II, seleccionados para la maduración *in vitro*. B. COC de gata tras 36 horas de maduración *in vitro*.

En el grupo de gatas menores de 6 meses se evaluaron 112 ovocitos, de los cuales 51 alcanzaron la metafase II, presentando una tasa de MIV de 45.54 ± 2.94%. Asimismo, 46 ovocitos permanecieron en metafase I (41.07 ± 1.89%) y 15 no pudieron ser evaluados (Tabla 1).

Por otro lado, en el grupo de gatas mayores de 6 meses se analizaron 238 ovocitos, observándose que 135 alcanzaron la metafase II, lo que correspondió a una tasa de MIV de 56.72 ± 4.79%. En este grupo, 62 ovocitos permanecieron en metafase I y, 33 de ellos, no fueron evaluados, mientras que 8, presentaron estados indeterminados (Tabla 1).

Los resultados obtenidos indican que los ovocitos provenientes de gatas mayores de 6 meses presentaron una mayor capacidad para completar la meiosis y alcanzar la metafase II en comparación con los ovocitos provenientes de gatas jóvenes.

Tabla 1. Tasa de maduración *in vitro* de ovocitos de gata de diferentes edades

	$n\ (\% \pm DE)$				
Grupo	n	MII	MI	No evaluados	Indeterminado
<6	112	51 (45.54±2.94)*	46 (41.07±1.89)	15 (13.39±2.25)	0 (0.0±0.0)
>6	238	135 (56.72±4.79)*	62 (26.05±3.30)	33 (13.87±4.72)	8 (3.36±1.19)

p<0.05

Las observaciones realizadas mediante microscopía de epifluorescencia permitieron identificar claramente las diferentes etapas meióticas de los ovocitos. Los ovocitos en metafase II presentaron cromosomas alineados en la placa metafásica y extrusión del primer cuerpo polar, mientras que los ovocitos en metafase I mostraron cromosomas alineados sin presencia de cuerpo polar (Figuras 2A y 2D). Asimismo, algunos ovocitos presentaron vesícula germinal o configuraciones compatibles con la anafase I, lo cual indica que no todos los ovocitos completaron exitosamente el proceso de maduración durante el tiempo de cultivo establecido (Figuras 2B y 2C).

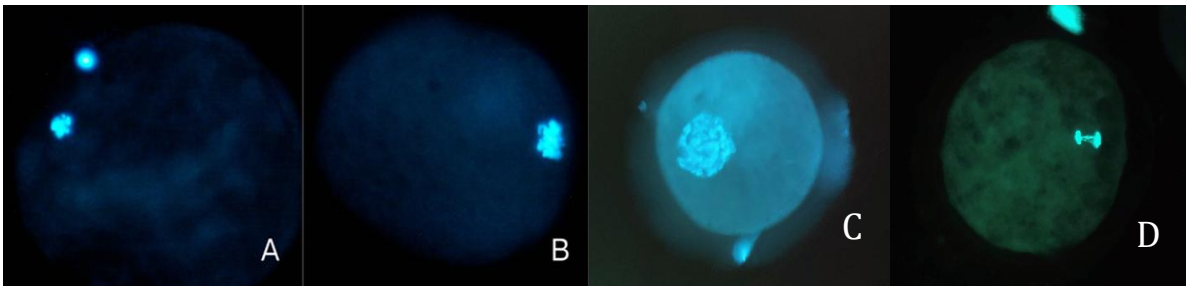


Fig. 2. Ovocitos de gatas domésticas tras MIV teñidos con DAPI observados bajo el microscopio de epifluorescencia. A. En metafase II (MII), los cromosomas se muestran alineados en la placa metafásica y se observa la extrusión del primer cuerpo polar (CP). B. Metafase I (MI), los cromosomas se muestran alineados en la placa metafásica, pero no se observa CP. C. Vesícula germinal (VG), núcleo agrandado del óvulo. D. Anafase (AI), las cromátidas hermanas se separan.

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se observó una mayor obtención de COC en gatas mayores a 6 meses; esto muy probablemente se debió a que las hembras ya se encontraban en sexualmente activas. Por otra parte, se observó una mayor tasa de MIV en las gatas mayores a 6 meses en comparación con aquellas menores de 6 meses. Este aspecto tiene que ver con la competencia de los ovocitos para reanudar la meiosis, que está sujeta a la etapa de la pubertad, en donde se presentan cambios hormonales que tienen un efecto a nivel morfológico y fisiológico de los ovarios y, en general, del aparato reproductor de la hembra (Johnson, 2022).

Los resultados de MIV obtenidos en este trabajo son similares a los reportados por otros autores 76% (Sowińska *et al*., 2017), 64.1% (Piras *et al*., 2020), 45% (Yoshida *et al*., 2022). Algunos de ellos

no indican la edad de las hembras y otros mencionan que emplearon ovarios de gatas por lo menos de un año de edad. Otros factores que intervienen en la tasa de MIV son la formulación del medio de maduración, el tiempo de maduración y las condiciones particulares de cada laboratorio.

Es importante recordar que esta especie es de ovulación refleja por lo que la madurez sexual de la hembra provee a los ovocitos las mejores condiciones para su propia madurez y, en su caso, fecundación y desarrollo embrionario. La estandarización de la MIV, así como de otras técnicas de reproducción asistida, resulta mejor utilizar ovocitos de gatas maduras de >6M de edad y esto también debe de considerarse cuando, en su momento, se trate de hembras felinas de especies silvestres

CONCLUSIONES

La edad de la hembra donadora influye en la capacidad de MIV de los ovocitos de gata doméstica. Los ovocitos provenientes de gatas mayores de 6 meses presentaron una mayor proporción de maduración a metafase II en comparación con los ovocitos obtenidos de gatas prepúberes menores de 6 meses. Estos resultados sugieren que la competencia meiótica aumenta conforme avanza el desarrollo reproductivo de la hembra. Asimismo, el presente estudio confirma la utilidad del gato doméstico como modelo experimental para el estudio de biotecnologías reproductivas aplicables a felinos silvestres. La optimización de los protocolos de maduración *in vitro* podría contribuir al mejoramiento de las técnicas de reproducción asistida y conservación genética en especies felinas. De tal modo que para la estandarización de la MIV, así como de otras técnicas de reproducción asistida, resulta mejor utilizar ovocitos de gatas maduras de >6M de edad y esto también debe de considerarse cuando, se trate de hembras felinas de especies silvestres.

BIBLIOGRAFÍA

1. Herrera, G. Landa, S. Gonzáles, F. Camarillo, F. Gual) Métodos para la contención de felinos silvestres en cautiverio. Universidad Autónoma Metropolitana. 2018. https://casadelibrosabiertos.uam.mx/contenido/contenido/Libroelectronico/Felinos.pdf
2. G. Baldini, D. Lot, A. Malvasi, A. Laganà, A. Vimercati, M. Dellino, E. Cicinelli, D. Baldini, y G. Trojano. Abnormalities of Oocyte Maturation: Mechanisms and Implications. International journal of molecular sciences, Vol *25*,22, 2024 https://doi.org/10.3390/ijms252212197
3. A.K. Johnson. Normal feline reproduction: The queen. Journal of feline medicine and surgery, Vol *24*,3, 2024, pp 204–211. https://doi.org/10.1177/1098612X221079706
4. W. Młodawska, B. Maliński, G. Godyn y B. Nosal. Lipid content and G6PDH activity in relation to ooplasm morphology and oocyte maturational competence in the domestic cat model. Reproductive biology, Vol *24*,3, 2024. https://doi.org/10.1016/j.repbio.2024.100927
5. Piras, F. Ariu, M. Zedda, M. Paramioy L. Bogliolo. Selection of Immature Cat Oocytes with Brilliant Cresyl Blue Stain Improves In Vitro Embryo Production during Non-Breeding Season. Animals*. Vol 10*,9 2020. https://doi.org/10.3390/ani10091496
6. Y. Torres. Viabilidad de las células de la granulosa criopreservadas y la capacidad de enucleación de ovocitos, en gata doméstica (Felis Catus). 2024 Tesis Maestría en BRA. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 74pp
7. N. Sowińska, K. Frankowska, A. Filipczyk, A. Adamaszek, K. Nalik, K. Fic y A. Pietsch-Fulbiszewska. The effect of cumulus cells on domestic cat (Felis catus) oocytes during in vitro maturation and fertilization. Reproduction in domestic animals *Vol 52* Supp*l 2* 2017 pp 108–113. https://doi.org/10.1111/rda.12895
8. T. Van Soom, T. Rijsselaere y M. Filliers. Cats and dogs: two neglected species in this era of embryo production in vitro?. Reproduction in domestic animals = Zuchthygiene, Vol 49 Suppl *2*. 2014. pp 87–91. https://doi.org/10.1111/rda.12303
9. Veraguas. Reprogramación de células somáticas de güiña (Leopardus guigna) mediante transferencia nuclear heteroespecífica utilizando ovocitos maduros de gata doméstica (Felissilvestris catus). 2018. Tesis doctoral- Universidad de Concepción, Chile.

10. T.C. Wood y D. Wildt. Effect of the quality of the cumulus–oocyte complex in the domestic cat on the ability of oocytes to mature, fertilize and develop into blastocysts in vitro. Reproduction Vol 110, 2. 1997 pp 355-360.
11. T. Yoshida, M. Alam, M. K. Hanafusa, Y. Tsujimoto, M. Tsukamoto, R. Kanegi, T. Inaba, K. Sugiura y S. Hatoya. Effects of the preservation medium and storage duration of domestic cat ovaries on the maturational and developmental competence of oocytes in vitro. The Journal of reproduction and development, Vol 68,2, 2022, pp. 160–164. https://doi.org/10.1262/jrd.2021-084

EFECTO ELICITOR DE NANOPARTICULAS DE QUITOSAN/ADN EN *Solanum Lycopersicum L* EN LA PRODUCCIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS TOTALES

Laura Mejía Teniente, Eva Michelle Hernández Guzmán, María de la Luz Sánchez Nava , Angela María Chapa Oliver, Claudia Patricia Grijalva, Jesús Rubén Rodríguez Núñez , Adán Topiltzin Morales Vargas, Vicente Peña Cababallero, Raúl Antonio García Martínez

Universidad de Guanajuato
Laura.mejia@ugto.mx

RESUMEN

Las nanopartículas de quitosano (NP-QN) son nanoestructuras de origen natural derivadas de la forma desacetilada de la quitina, que han emergido como sistemas transportadores de gran interés en el sector agrícola debido a sus propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad y baja toxicidad, convirtiéndose en herramientas prometedoras para el desarrollo de estrategias sostenibles. Dada su carga positiva que facilita fuertes interacciones electrostáticas con nucleótidos con carga negativa, actualmente, se explora su uso como vehículos para la liberación controlada de diferentes tipos de moléculas, incluido ADN. Por otro lado, el tomate (Solanum lycopersicum L.) es una de las hortalizas más cultivadas y consumidas a nivel mundial, siendo México el octavo país productor con 5 millones de toneladas. Sin embargo, enfrenta diversos factores limitantes que afectan su rendimiento, calidad y comercialización, principalmente factores ambientales y fitosanitarios. Para abordar esto de manera sostenible, se estudia la inducción del sistema de defensa vegetal mediante elicitores, moléculas químicas o biológicas que activan mecanismos de defensa, donde los compuestos bioactivos actúan como principales indicadores de la respuesta bioquímica. Bajo este contexto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto elicitor de NP-QN cargadas con ADN viral fragmentado sobre la inducción de compuestos bioactivos como principales indicadores de la resistencia inducida de defensa en plantas de tomate. Las NP-QN-ADN empleadas fueron generadas por gelificación ionotrópica. Se evaluaron tres concentraciones de NP-QN-ADN (0.3, 0.6 y 1.2 g/mL de NP-QN cargadas con 100 ng/µL de ADN viral fragmentado por sonicación en cada tratamiento de NP-QN) y un tratamiento control con agua. El ADN viral se obtuvo a partir de la clona del virus del mosaico dorado del chile (PepGMV), fitopatógeno significativo en solanáceas. Se realizó la aplicación foliar y semanal de NP-QN-ADN en plántulas de tomate hasta fructificación. La respuesta bioquímica se evaluó mediante la cuantificación de fenoles (Folin-Ciocalteu), taninos (Vainillina-HCl) y flavonoides ($AlCl_3$), expresados como equivalentes de ácido gálico (mg mL^{-1} EAG) y catequina (mg mL^{-1} EC), respectivamente, mediante espectrofotometría en microplaca. Los resultados indican que el tratamiento con 0.3 g/mL de NP-QN–100 ng/µL de ADN viral fragmentado promovió el mayor contenido de fenoles (0.1533 ± 0.0032 mg/mL EAG) en comparación con el control (0.1004 mg/ mL EAG). En contraste, la concentración de 1.2 g/mL NP-QN–100 ng/µL de ADN viral fragmentado indujo significativamente mayores niveles de flavonoides (0.1191 ± 0.0077 mg/mL EC) y taninos (0.878 mg/mL EC) respecto al control 0.0766 mg/mL EC para flavonoides y 0.748 mg/mL EC para taninos. En conclusión, estos resultados evidencian que las NP-QN cargadas con ADN viral fragmentado actúan como elicitores efectivos en plantas de tomate, promoviendo la síntesis de compuestos bioactivos asociados a mecanismos de defensa, cuya respuesta depende de la concentración, modulando diferencialmente la síntesis de compuestos bioactivos en plantas tomate. Finalmente, se aporta evidencia sobre el potencial de los sistemas nanoestructurados basados en quitosano como herramientas biotecnológicas para mejorar la calidad nutracéutica de cultivos agrícolas, abriendo perspectivas para su aplicación en el manejo sostenible de cultivos.

INTRODUCCIÓN

El tomate (Solanum lycopersicum L) es uno de los cultivos hortícolas más consumidos y de mayor importancia en México y a nivel mundial, no solamente es producido para su consumo en fresco, sino que aproximadamente el 40% de la producción total se destina a la transformación industrial, dando lugar a la generación de muchos subproductos derivados de la industria alimentaria como es pasta, sopa, salsa, polvo, puré, conserva de tomate entero o partido, entre otros (Bergougnoux, 2014).

Más allá de su uso alimenticio, el tomate tiene aplicaciones en distintas áreas industriales, en la industria de pigmentos con la producción de licopeno como colorante alimentario, en la producción de oleorresinas y como fuente de compuestos de intereses para la industria farmacéutica, gracias a su composición química y concretamente por la presencia de compuestos bioactivos beneficiosos para el organismo (Campos, 2020), atribuyéndole también estos beneficios al elevado contenido de varios compuestos con actividad antioxidante como carotenoides, vitamina E, vitamina C, folatos, y compuestos fenólicos como flavonoides y ácidos hidroxicinamicos (Dorais et al., 2008)

De acuerdo con datos de la Food and Agriculture Organization (FAO, 2024) la producción mundial de tomate supera los 188 millones de toneladas anuales, cultivadas en más de 5 millones de hectáreas. Entre los principales países productores de esta hortaliza se encuentra china, India, Turquía, y Estados Unidos, ocupando México el octavo lugar en producción, con aproximadamente 4.4 millones de toneladas al año. A nivel nacional la superficie total sembrada de tomate fue de 31,044 hectáreas, donde la mayor producción fue en los estados de Sinaloa, San Luis Potosí y Michoacán, con un rendimiento promedio de 38 toneladas por hectárea (Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024).

La acumulación y producción de compuestos bioactivos en las plantas puede ser modulado mediante diferentes factores, incluyendo factores bióticos, ambientales, manejo agronómico y la aplicación de elicitores (Maquencia et al., 2025). Los elicitores pueden ser células completas, fracciones de ellas, moléculas o componentes específicos (Vázquez et al., 2019) capaces de activar respuestas de defensa en las plantas al simular la presencia de patógenos o señales de estrés, lo que produce la activación de las rutas metabólicas asociadas a la síntesis de metabolitos secundarios, particularmente la vía de los fenilpropanoides (Zhao et al., 2005). Entre los elicitores más estudiados se encuentra el quitosano, un polisacárido derivado de la desacetilacion de la quitina, el cual debido a su tamaño reducido y mayor área superficial favorece una interacción más eficiente con el tejido vegetal, siendo una matriz ideal para generar nanoencapsulados de quitosano con fracciones de ADN que funcionará como partículas acarreadoras, que al estar en contacto con la superficie foliar será degradado (Zerpa, Rincón & Colina,2017).

Bajo este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto elicitor de nanopartículas de quitosan/ADN en plantas de Solanum lycopersicum, enfocándose particularmente en su impacto sobre la producción de compuestos bioactivos totales, los cuales constituyen indicadores importantes en la activación del metabolismo secundario y del potencial antioxidante del cultivo.

TEORÍA

Importancia de *Solanum lycopersicum L.*

El tomate (Solanum lycopersicum L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial debido a su elevada producción, valor económico y amplia participación en la alimentación humana. Su consumo per cápita ha aumentado en las últimas décadas, reflejando su creciente relevancia en la dieta global (Food and Agriculture Organization, 2024). Además de su versatilidad culinaria, el tomate constituye una fuente importante de vitaminas A y C, así como de minerales como potasio, fósforo y magnesio. Entre sus compuestos bioactivos destacan los carotenoides, principalmente el licopeno, que representa aproximadamente el 83 % del contenido total y posee una elevada capacidad antioxidante, además de β-caroteno y otros pigmentos con actividad provitamina A. En México, el tomate se consume principalmente en fresco, aunque también se utiliza

ampliamente en la elaboración de salsas, purés, jugos y otros productos procesados (Dorais et al., 2018).

Mecanismos de defensa en plantas

Las plantas poseen mecanismos de defensa físicos, bioquímicos y moleculares que les permiten responder al ataque de patógenos y plagas (Agrios, 2005; Walters et al., 2007). Las barreras físicas, como la cutícula, la pared celular y los tricomas, constituyen la primera línea de protección, mientras que las defensas bioquímicas incluyen la producción de metabolitos secundarios, como fenoles, flavonoides y fitoalexinas, así como especies reactivas de oxígeno (ROS) con actividad antimicrobiana (Agrios, 2005; Buchanan et al., 2015). A nivel molecular, el reconocimiento de moléculas asociadas a patógenos activas rutas de señalización reguladas por hormonas como el ácido salicílico, el jasmonato y el etileno, promoviendo respuestas de defensa local y sistémica, incluida la resistencia sistémica adquirida (SAR) y la expresión de proteínas relacionadas con la patogénesis (Sessa, 2014; Walters et al., 2007).

Compuestos fenólicos en el tomate

Los compuestos fenólicos constituyen un grupo de metabolitos secundarios caracterizados por la presencia de uno o más grupos fenólicos en su estructura. En el tomate, los ácidos fenólicos y los flavonoides son los compuestos más abundantes, destacando por su actividad antioxidante y su participación en la respuesta de defensa frente a patógenos y diversos factores de estrés (Martínez et al., 2002). Su biosíntesis ocurre principalmente a través de la vía de los fenilpropanoides, cuya enzima clave es la fenilalanina amonio liasa (PAL), responsable de catalizar el primer paso de esta ruta metabólica (Martínez et al., 2002).

Elicitores

Los elicitores son moléculas capaces de activar mecanismos de defensa en las plantas mediante el reconocimiento por receptores específicos, desencadenando respuestas bioquímicas, fisiológicas y moleculares (Mejía-Teniente et al., 2010; Jiménez et al., 2024). Debido a esta capacidad, se han convertido en una estrategia prometedora para inducir resistencia y aumentar la tolerancia de los cultivos frente a factores de estrés biótico y abiótico. Los elicitores pueden ser de origen endógeno o exógeno, así como bióticos o abióticos (Guarnizo et al., 2020; Meena et al., 2022; Reglinski, 2023). Su acción promueve la síntesis de metabolitos secundarios, proteínas relacionadas con la patogénesis y especies reactivas de oxígeno, fortaleciendo la respuesta inmune vegetal (Mejía-Teniente et al., 2013).

Nanopartículas de quitosan (NP-QN)

Las nanopartículas de quitosano (NP-QN) son nanoestructuras de origen natural obtenidas a partir del quitosano, un polisacárido derivado de la desacetilación de la quitina, uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza y presente principalmente en exoesqueletos de crustáceos, insectos y paredes celulares de hongos. Debido a su naturaleza biocompatible, biodegradable, renovable y de baja toxicidad, las NP-QN han despertado un creciente interés como sistemas de transporte en aplicaciones agrícolas y biotecnológicas orientadas al desarrollo sostenible (Kumar et al., 2004; Dash et al., 2011). En el ámbito agrícola, las NP-QN se investigan como vehículos para la liberación controlada y dirigida de material genético, ADN extragénico, incluyendo plásmidos, ARN interferente (RNAi) y sistemas de edición genética. Estas nanopartículas facilitan la internalización celular y pueden mejorar la transferencia génica en tejidos vegetales sin recurrir a métodos más invasivos o costosos. Además, su capacidad para liberar gradualmente la carga transportada permite mantener concentraciones efectivas durante períodos prolongados, reduciendo pérdidas y aumentando la eficiencia biológica (Torney et al., 2007; Demirer et al., 2019). En la presente investigación se emplearán como vehículos acarreadores de ADN plasmídico fragmentado del componente A del Virus del Mosaico Dorado del Chile (PepGMV) (Garcia-Martinez et al., 2024) y evaluar su efecto elicitor sobre la inducción de compuestos bioactivos totales como indicadores de la inducción de la respuesta bioquímica de defensa de las plantas de tomate.

PARTE EXPERIMENTAL

Extractos polifenólicos

Los extractos polifenólicos fueron extraídos mediante soluciones de metanol (MetOH) y agua. Para los fenoles totales se utilizó una solución de 30:70 (v/v), para flavonoides y taninos se utilizó metanol absoluto (MetAbs), siguiendo la metodología descrita por Grijalva-Verdugo, et al. (2022).

Determinación de Fenoles Totales

Los fenoles solubles totales fueron obtenidos por reacción del reactivo Folin-Ciocalteu y cuantificado por espectrofotometría en microplaca siguiendo la metodología descrita por Grijalva-Verdugo et. al. (2022). La absorbancia se leyó a 750 nm usando un espectrofotómetro Multiskan GO (Thermo Fisher Scientific). La cuantificación de fenoles totales se llevó a cabo empleando la curva de calibración reportada por Grijalva-Verdugo (2022), basada en un estándar de ácido gálico (Fermont). La relación entre absorbancia y concentración se describió mediante la ecuación Abs_{750} = 0.2643 [ácido gálico] − 0.006 (R^2 = 0.9898). Los resultados se expresaron como miligramos equivalentes de ácido gálico por mililitro (mg mL^{-1} EAG).

Determinación de Flavonoides Totales

Los flavonoides se obtuvieron siguiendo la metodología de Grijalva-Verdugo (2022), modificando las cantidades y volumen final. La absorbancia se midió a 510 nm contra el blanco utilizando un espectrofotómetro Multiskan GO. Siguiendo con la curva de calibración obtenida por Grijalva-Verdugo (2022), con estándar de catequina = 0.5803 (Abs510) + 0.0538, R^2 = 0.9817 obteniendo los resultados en miligramos equivalentes de catequina por mg de hoja fresca (mg/ml EC). La ecuación de calibración se aplicó sin ajustes, dado que las condiciones experimentales empleadas en este estudio fueron consistentes con las descritas en la metodología original.

Determinación de Taninos

Los Taninos se obtuvieron siguiendo la metodología de Grijalva-Verdugo (2022). Con la modificación en la temperatura de incubación a 35°C. La absorbancia se midió a 500 nm contra el blanco usando un espectrofotómetro Multiskan GO. Siguiendo la curva de calibración elaborada por Grijalva-Verdugo et al. en 2022 Debido a que no se realizaron modificaciones a la curva de calibración, ya que el procedimiento experimental utilizado no presentó diferencias relevantes con respecto al método previamente reportado., con catequina = 5.5325 (Abs500) - 0.1577, R^2 = 0.9866. El contenido de taninos condensados se obtuvo como miligramos de equivalentes de catequina por mililitro (mg/ml EC).

RESULTADOS

Los resultados de la Fig.1 y Fig. 2 muestran el contenido de fenoles y flavonoides encontrados en el análisis de plantas siguiendo la metodología descrita por Grijalva-Verdugo (2022) por reacción mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu y complejación con cloruro de aluminio ($AlCl_3$**)** respectivamente, para después hacer la cuantificación por espectrofotometría de placa.
Como se puede observar en las gráficas, la aplicación de NP cargadas con ADN incrementó el contenido de fenoles y flavonoides totales respecto al control. En ambas, el mayor efecto se observó en T1, mientras que concentraciones mayores (T2 y T3) no aumentaron más el contenido fenólico e incluso mostraron una ligera disminución.

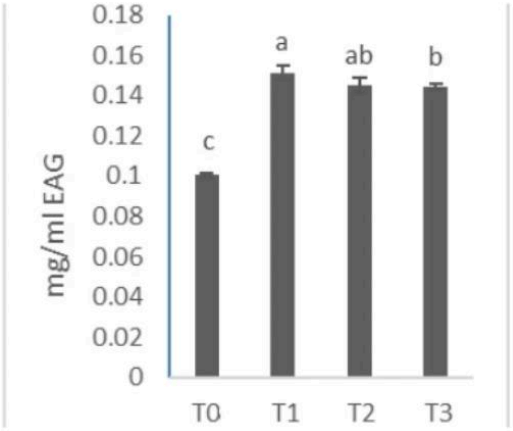


Fig 1. Comparación del contenido de fenoles totales en plantas de tomate sometidas a diferentes tratamientos: T0 (control), T1-T3 (NP-QN cargadas con ADN plasmídico fragmentado (0.3, 0.6 y 1.2 g/mL).

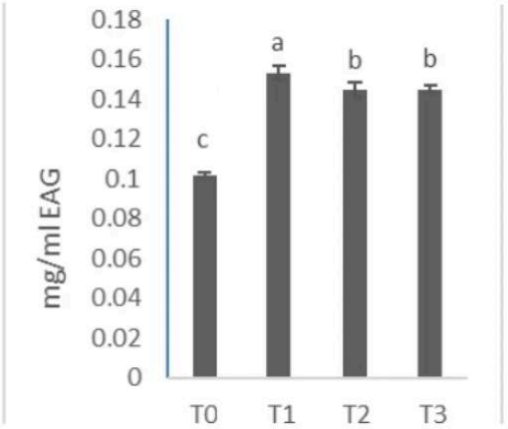


Fig 2. Comparación del contenido de flavonoides totales en plantas de tomate sometidas a diferentes tratamientos: T0 (control), T1-T3 (NP-QN cargadas con ADN plasmídico fragmentado (0.3, 0.6 y 1.2 g/mL)).

A diferencia de lo observado para fenoles y flavonoides, donde la mayor respuesta ocurrió en T1, en este caso el mayor contenido de taninos se obtuvo en T3.

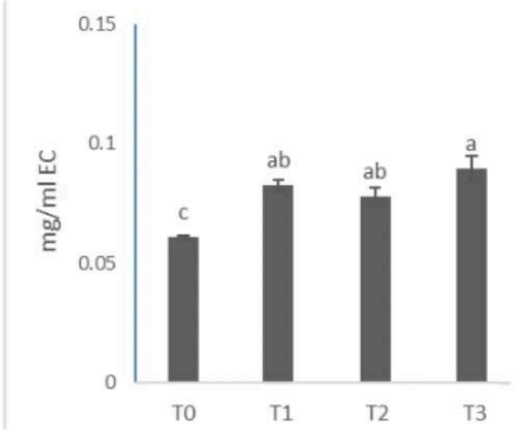


Fig 3. Comparación del contenido de taninos totales en plantas de tomate sometidas a diferentes tratamientos: control (T0), NP-QN cargadas con ADN plasmídico fragmentado a concentraciones de 0.3, 0.6 y 1.2 g/mL (T1–T3).

CONCLUSIONES

Los resultados de las tres gráficas muestran que la aplicación de nanopartículas de quitosano cargadas con ADN (NP-QN ADN) tuvo un efecto positivo sobre la acumulación de metabolitos secundarios en las plantas de tomate. En comparación con el tratamiento control (T0), todos los tratamientos incrementaron los contenidos de fenoles, flavonoides y taninos, compuestos relacionados con la capacidad antioxidante y los mecanismos de defensa de la planta.

Para los fenoles y flavonoides totales, el mayor contenido se observó en T1, mientras que concentraciones más altas (T2 y T3) mantuvieron valores elevados, pero ligeramente inferiores. En contraste, los taninos totales alcanzaron su máximo valor en T3, lo que indica que este grupo de compuestos respondió mejor a una mayor concentración del tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. G. N. Agrios, Plant pathology (5th ed.), Elsevier Academic Press, 2005
2. V. Bergougnoux, “The history of tomato: from domestication to biopharming”, Biotechnology Advances, Vol. 32, 1, 2014, pp. 170-189.
3. B. B. Buchanan, W. Gruissem, R. L. Jones, Biochemistry and molecular biology of plants (2nd ed.), Wiley Blackwell, 2015.
4. G. Campos, “Extracción y caracterización de licopeno mediante ultrasonido de alta intensidad y tecnología verde, a partir de desechos de tomate (Solanum lycopersicum)”, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, 2020.
5. M. Dash, F. Chiellini, R. M. Ottenbrite, E. Chiellini, “Chitosan—A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications”, Progress in Polymer Science, Vol. 36, 8, 2011, pp. 981–1014.
6. G. S. Demirer, H. Zhang, N. S. Goh, E. González-Grandío, M. P. Landry, “Carbon nanotube mediated DNA delivery without transgene integration in intact plants”, Nature Protocols, Vol. 14, 10, 2019, pp. 2954–2971.
7. K. Divya, S. Vijayan, S. J. Nair, M. Jisha, “Optimization of chitosan nanoparticle synthesis and its potential application as germination elicitor of Oryza sativa L.”, International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 124, 2019, pp. 1053–1059.
8. M. Dorais, D. Ehret, A. Papadopoulos, “Tomato (Solanum lycopersicum) health components: from the seed to the consumer”, Phytochemistry Reviews, Vol. 7, 2, 2008, pp. 231–250.
9. Food and Agriculture Organization (FAO), “Production Indices”, 2024.
10. R. A. García-Martínez, D. G. Hernández-Olalde, F. Martínez-Esquivel, A. M. Chapa-Oliver, T. L. Mejía, “Establecimiento y estandarización de condiciones de sonicación de ADN fitopatógeno y evaluación electroforética”, Jóvenes en la Ciencia, University of Guanajuato, Vol. 28, 2024.
11. C. Grijalva-Verdugo, J. R. Rodríguez-Núñez, C. A. Núñez-Colín, C. L. Aguirre-Mancilla, D. Montoya-Anaya, J. M. Villarreal-Fuentes, M. G. Rodríguez-Carrillo, “Total polyphenolics, antioxidants, and cytotoxic activity of infusions from soursop (Annona muricata) leaves from two Mexican regions”, Agronomía Colombiana, Vol. 40, 2, 2022, pp. 300–310.
12. N. Guarnizo, D. Oliveros, W. Murillo, M. Bermúdez, “Oligosaccharides: defense inducers, their recognition in plants and application prospects”, Molecules, Vol. 25, 24, 2020.
13. Inderjit, K. G. Mukerji, Allelochemicals: biological control of plant pathogens and diseases, Springer, 2006.
14. Jiménez, J. Soto, V. Cambrón, A. Alvarado, “¿Qué son los elicitores?: su uso en la agricultura”, Bioagrociencias, Vol. 18, 1, 2024.
15. M. N. V. R. Kumar, R. A. A. Muzzarelli, C. Muzzarelli, H. Sashiwa, A. J. Domb, “Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives”, Chemical Reviews, Vol. 104, 12, 2004, pp. 6017–6084.
16. J. Lucas, P. Northing, B. Cameron, Plant defence: Biological control, Wiley-Blackwell, 2010.

17. S. D. Z. Maquencia, L. I. N. Coello, J. N. Q. Guerrero, J. M. Q. Campoverde, “Elicitores: efecto fitovacuna en la prevención de síntomas de Sigatoka negra en el cultivo de banano”, Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Vol. 9, 4, 2025, pp. 4673–4689.
18. Martínez, M. Periago, G. Provan, A. Chesson, “Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (Lycopersicum esculentum)”, Journal of the Science of Food and Agriculture, Vol. 82, 3, 2002, pp. 323–330.
19. L. Mejía-Teniente, F. de Dalia Durán-Flores, A. M. Chapa-Oliver, I. Torres-Pacheco, A. Cruz-Hernández, M. M. González-Chavira, R. G. Guevara-González et al., “Oxidative and molecular responses in Capsicum annuum L. after hydrogen peroxide, salicylic acid and chitosan foliar applications”, International Journal of Molecular Sciences, Vol. 14, 5, 2013, pp. 10178–10196.
20. L. Mejía-Teniente, I. Torres-Pacheco, M. M. González-Chavira, R. V. Ocampo-Velázquez, G. Herrera-Ruiz, A. M. Chapa-Oliver, R. G. Guevara-González, “Use of elicitors as an approach for sustainable agriculture”, African Journal of Biotechnology, Vol. 9, 54, 2010, pp. 9155–9162.
21. R. Pichyangkura, S. Chadchawan, “Biostimulant activity of chitosan in horticulture”, Scientia Horticulturae, Vol. 196, 2015, pp. 49–65.
22. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), “Avance de siembras y cosechas: ciclo agrícola otoño-invierno de jitomate (tomate rojo)”, Gob.mx, 2024
23. G. Sessa, Plant immunity: methods and protocols, Springer, 2014.
24. F. Torney, B. G. Trewyn, V. S. Y. Lin, K. Wang, “Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants”, Nature Nanotechnology, Vol. 2, 5, 2007, pp. 295–300.
25. M. Vázquez, I. Parola, L. Montoya, P. Torres, D. Schwarz, R. Guevara, “Eustressors: chemical and physical stress factors used to enhance vegetables production”, Scientia Horticulturae, Vol. 250, 2019, pp. 223–229.
26. D. Walters, A. Newton, G. Lyon, Induced resistance for plant defence, Wiley-Blackwell, 2007.
27. J. Zerpa, M. Rincón, J. Colina, “Efecto del uso del quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (Oryza sativa L. variedad SD20A)”, RIAA, Vol. 8, 2, 2017, pp. 151–165.
28. J. Zhao, L. Davis, R. Verpoorte, “Elicitor signal transduction leading to production of plant secondary metabolites”, Biotechnology Advances, Vol. 23, 4, 2005, pp. 283–333

PRODUCCIÓN DE ENZIMAS EXTRACELULARES Y POLISACÁRIDO DE LEVAN POR BACTERIAS HETERÓTROFAS AISLADAS DE UN NIDO DE HORMIGAS LOCALIZADO EN EL CERRO CUTHA (TEHUACAN, PUEBLA)

María Teresa Núñez-Cardona, Adriana Vargas Rosas y Patricia Castilla Hernández

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco.
mtnunez@correo.xoc.uam.mx

RESUMEN

Las hormigas, artrópodos pertenecientes a la familia Formicidae, son considerados como los primeros insectos sociales, habitan comúnmente suelos en los que construyen nidos subterráneos. La microbiota intestinal de las hormigas y de sus nidos, participa en sus procesos vitales, tales como la producción de antibióticos (que las protegen), de enzimas extracelulares (Ej. proteasas, amilasas y lipasas), que inhiben el crecimiento de otros organismos (Ej. a hongos fitopatógenos)[1] o bien que intervienen, en la degradación de material vegetal y generar azúcares digeribles[2]; además de participar en el reciclamiento y descomposición de materiales orgánicos, que modifican las propiedades químicas de los suelos; por otro lado, los polisacáridos además de activar procesos de mineralización, incrementan el metabolismo de la microbiota del suelo. El objetivo del presente estudio fue determinar la capacidad de producir enzimas extracelulares y al polisacárido de Levan (compuesto bioactivo) por bacterias heterótrofas aisladas de un nido de hormigas. Se seleccionó un nido cercano (10 m de distancia) a la entrada de la tumba del último rey Popoloca, en la cima del cerro Cutha (Zapotitlan Salinas, Tehuacan, Puebla). Para colectar la muestra, se introdujo un hisopo estéril al interior del nido, la parte expuesta fue cortada (tijeras esterilizadas con alcohol y flama) y colocada en un tubo de ensaye conteniendo caldo nutritivo (medio de cultivo no selectivo para el crecimiento bacteriano), se incubó a temperatura ambiente durante una hora y a partir del cultivo líquido se hicieron diluciones y se resembraron (con 0.1 ml) en agar nutritivo. Después de la incubación (24 horas a 28 °C), se aislaron colonias bacterianas, se aplicó la técnica de siembra y resiembra para obtener cultivos puros (verificado al microscopio óptico, previa tinción de Gram); se determinó su capacidad de producir enzimas extracelulares (lipasa, ADNasa, gelatinasa, amilasa y ureasa) y al polisacárido de Levan. Se obtuvieron 21 cultivos puros, todos con formas esféricas (cocos), el 57% presentó respuesta negativa a la tinción de Gram; el 81% produjo gelatinasa (proteasa), 76% lipasa, 67% ADNasa, 52% al polisacárido de Levan, sólo el 48% produjeron amilasa y ureasa, esta última hidroliza a la urea para generar amonio (fuente de nitrógeno para las plantas). Se observó que siete de los cultivos (colonias rojas), produjeron, además del polisacárido de Levan, entre cuatro y cinco de las enzimas. Todas las bacterias aisladas del nido presentaron formas de cocos, poco reportados en la literatura como habitantes de nidos de hormigas; estas bacterias produjeron, principalmente, gelatinasa, lipasa y ADNasa, lo que evidencia su función en la descomposición de materia orgánica en el suelo.

INTRODUCCIÓN

Las hormigas pertenecen a la familia Formicidae, son consideradas como los primeros insectos sociales y habitantes típicos de suelos, en los que construyen nidos subterráneos, algunos con formas bien definidas que sorprenden por su perfección. Sus alimentos son diversos y algunas especies los recolectan de forma selectiva y los cambian temporalmente; pueden ser omnívoras, micófagas, granívoras, depredadoras, forrajeras, etc. A las hormigas se les ha considerado ingenieras del ambiente debido a que mantienen y restauran suelos; la fertilización orgánica es otra de sus funciones, la cual está dada, por su actividad forrajera y la construcción de nidos, reflejándose todo ello, por ejemplo, en la estructura de las comunidades vegetales y en su participación en los flujos de la materia y energía de los ecosistemas[1]. El éxito ecológico y evolutivo de las hormigas es multifactorial, que se deriva en modificaciones sociales como la división de las labores en la colonia y el trabajo cooperativo

Se han realizado estudios enfocados al análisis de los microorganismos asociados a los nidos de hormigas, en especial a los hongos que cultivan algunas especies de estas.

Se ha observado que, microbiota asociada a las hormigas, produce una gran diversidad de compuestos bioactivos que incluye antimicrobianos los cuales las protegen de agentes patógenos; también sintetizan enzimas extracelulares que intervienen en el reciclamiento y descomposición de materiales orgánicos (Ej. material vegetal) lo cual influye, por ejemplo, en las propiedades químicas del suelo. Se ha informado sobre su importancia como bioindicadoras de la calidad del ambiente y en el control biológico de plagas. El objetivo del presente estudio fue determinar la capacidad de producir polisacárido de levan y enzimas extracelulares, por bacterias heterótrofas aisladas de un nido de hormigas localizado en el cerro Cutha (Zapotitlan Salinas, Tehuacan, Puebla).

TEORÍA

Las hormigas, del Orden Hymenoptera, familia Formicidae, desempeñan, como otros insectos, un papel fundamental en los ciclos biogeoquímicos que implica la transformación, transporte y transferencia de la materia y la energía en los ecosistemas; enriquecen suelos, dispersan semillas y microorganismos (Ej. bacterias fijadoras de nitrógeno); también son depredadoras, ingenieras de ecosistemas, cultivadoras de hongos, gestoras de residuos, biotecnólogas, controladoras de plagas, soldados y reproductoras, etc. Numerosas funciones que realizan las hormigas se deben la microbiota, asociada a estas, especialmente hongos y bacterias; se ha informado que, dentro de las primeras están α, β y γ, Proteobacteria (todas estas son Gram negativas), además de Flavobacterias y Actinomicetos las cuales facilitan a las hormigas, nitrógeno, aminoácidos esenciales, vitaminas, antibióticos, compuestos bioactivos y enzimas hidrolíticas como es la ureasa que participa con la glutamina sintetasa y la reducción de sulfato. Algunas hormigas, como por ejemplo *S. richteril*, producen lipasas en las glándulas mandibulares y salivales, el intestino anterior, medio y posterior, lo que se correlaciona con los hábitos alimenticios ricos en grasa de esta especie[2].

Se le atribuye a Blochmann (1887) la primera observación de “similares a bacteris” denominados cuerpos de Blochmanm, asociadas a dos especies de hormigas *Camponotus ligniperdus* y *Formica fusca* (Hymenoptera: Formicidae), actualmente se sabe que los cuerpos de Blochmann son bacterias que se localizan en micetocitos del intestino medio y ovarios de numerosas hormigas. La presencia de las bacterias en los ovocitos de las reinas y las obreras sugiere la transmisión materna para los endosimbiontes y se ha observado, por microscopía electrónica, que las membranas de estas bacterias tienen una respuesta negativa a la tinción de Gram[2]

Desde el siglo pasado, se ha estudiado a microorganismos con capacidad para producir enzimas extracelulares y compuestos bioactivos debido a su gran utilidad y aplicación en la agricultura, la 0medicina e industrias como por ejemplo la alimentaria, la textil y del cuero. Enzimas como la lipasa se utilizan ampliamente en la industria de aceites, grasas, lácteos, detergentes y como terapéuticos[3] De acuerdo con Salazar y colaboradores[4], con estas enzimas se posibilita la producción de fármacos más selectivos y efectivos. La amilasa se utiliza en la industria alimentaria y farmacéutica para convertir el almidón en jarabe de azúcar, en tanto que la DNasa o ADNasa, además de descomponer al ADN, se ha observado que la DNasa recombinante, tiene efectos positivos sobre la inflamación de las vías aéreas en pacientes con fibrosos quística. La ureasa cataliza la hidrólisis de urea y se produce amonio[5], el cual es una fuente de nitrógeno para los vegetales por lo que puede ser utilizado como biofertilizante. Aunque es importante mencionar que las hormigas también pueden transportar bacterias patógenas, ejemplo de estas son las hormigas faraonas (*Monomorium pharaonis*), que pueden ser portadoras y propagadoras de especies patógenas que incluyen a *Serratia marcescens, Citrobacter freundii, Klebsiella ozaennae, Enterobacter aerogenes, Proteus mirabilis, Staphylococcus epidermidis y Yersinia pestis*, además de *Bordetella bronchiseptica* responsable de enfermedades respiratorias en animales. La patogenicidad de las bacterias está en relación a la producción de enzimas extracelulares como las ensayadas en la presente investigación

PARTE EXPERIMENTAL

Zapotitlán Salinas (Tehuacan, Puebla), se localiza a: 18°20'39"N, 97°26'54"W y forma parte de la reserva de la Biosfera Zapotitlan Cuicatlan; es una región árida, de las más importantes en México debido a sus características geológicas y biogeográficas, cuenta con una gran biodiversidad, con numerosas especies endémicas de flora y fauna**.**

Para realizar el presente estudio, se seleccionó un nido de hormigas, ubicado en la cima del Cerro de las Máscaras, frente a la tumba del último rey Popoloca. Para colectar las muestras se introdujo un hisopo (estéril) en el interior del hormiguero y mediante el uso de tijeras estériles se cortó la parte expuesta de este y se colocó en un tubo de ensaye conteniendo caldo nutritivo, después de una hora de incubación, a temperatura ambiente, se inocularon cajas Petri conteniendo agar nutritivo, una vez que se observó el crecimiento de las colonias, se hicieron aislamientos de estas, al azar, y se estriaron en agar nutritivo; s cultivos de 18 horas de incubación a 28°C, se les aplicó la tinción de Gram para determinar su respuesta a esta y su pureza; en caso de contar con cultivos mixtos, se aplicó la técnica de siembra y resiembra, hasta obtener cultivos puros, lo cual se verificó tras aplicar la tinción de Gram y observaciones al microscopio óptico.

Para determinar la producción de las enzimas, cada cultivo puro se hizo crecer en caldo nutritivo durante una hora, con estos y con ayuda de un asa de vidrio estéril, fueron inoculados los medios específicos para cada una de estas (10 cultivos bacterianos por caja Petri), se incubaron durante 24 horas a 28°C, antes de agregar, diferencialmente el reactivo que permitió determinar la producción de la enzima correspondiente. Para la preparación de los medios con el sustrato, por cada 1000 ml de medio de cultivo se agregó 23 g de agar nutritivo con las especificaciones siguientes. En los párrafos siguientes se indica la composición de cada medio de cultivo y los reactivos utilizados.

Amilasa: 1.5 g de almidón y 5.0 g de cloruro de sodio; agregar lugol. Para gelatinasa: 4.0 g de gelatina bacteriológica; agregar cloruro mercúrico (15 g de cloruro mercúrico, 20.0 ml de HCl y 100 ml de agua destilada). En el caso de la ADNasa se utilizó la fórmula comercial (Agar para ADNasa); agregar HCl 1N. Para estas tres enzimas, después de agregar el reactivo correspondiente, la presencia de un halo transparente alrededor del inóculo, indicó la producción de las enzimas

Para determinar la capacidad de producir al polisacárido de Levan, se utilizó un medio compuesto por: 1000 ml de agua destilada, 23 g de AN, 40 g de sacarosa. El aspecto viscoso y fluído en el inóculo indicó una respuesta positiva; la producción de lipasa se determinó con un medio de cultivo compuesto por 23 g de AN y 10 ml de Tween 80; La formación de cristales blancos alrededor del inóculo indicó una respuesta positiva. En el caso de la ureasa se utilizó la formula comercial Base de agar Urea de Christensen (fórmula comercial). El cambio de color, de amarillo a rosa intenso, indicó la hidrólisis de la urea.

Los medios de cultivos antes descritos fueron modificados con base en lo expuesto por Núñez (1989)[6]

RESULTADOS

Se obtuvieron 21 cultivos puros, todos con formas esféricas (cocos), el 57% presentó respuesta negativa a la tinción de Gram, el 81% produjo gelatinasa (proteasa), 76% lipasa, 67% ADNasa y 52% polisacárido de Levan; sólo el 48% produjeron amilasa y ureasa (Fig. 3). Como se presenta en la tabla 1. tres cultivos, además de producir al polisacárido de levan, son capaces de producir cinco enzimas y otros seis a cuatro de ellas. Cabe señalar que seis de estos cultivos forman colonias de color rojo (con respuesta negativa a la tinción de Gram), por lo que es necesario aplicar técnicas complementarias para determinar la producción de otros compuestos bioactivos (Ej. antioxidantes) como puede ser bacterioclorofila a.

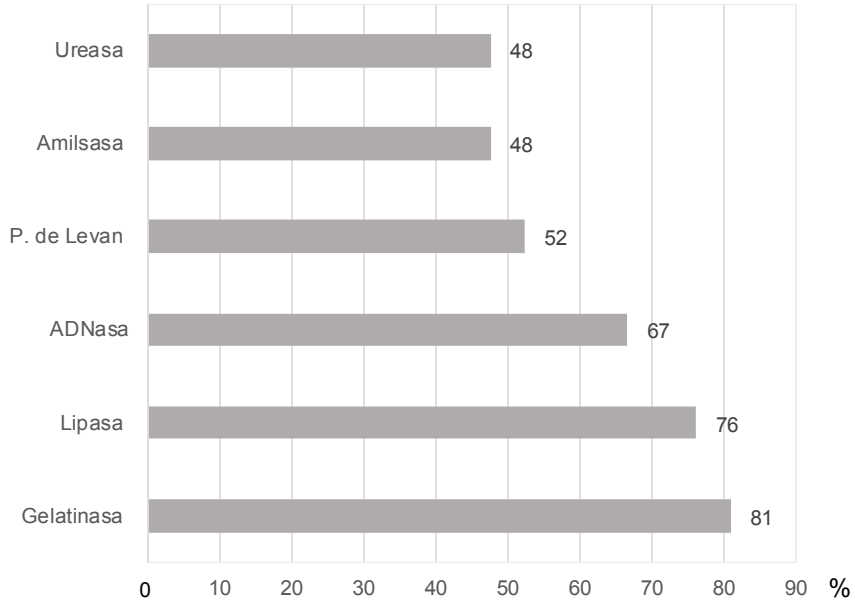


Tabla 1. Características morfológicas, respuesta a la tinción de Gram, producción de enzimas etracelulares y al polisacárido de Levan (gris indica respuesta positiva=producción de la enzima o el polisacárido)

Clave del cultivo	Color de la colonia	Gram	Lipasa	Gelatinasa	ADNasa	Amilasa	Ureasa	Polisacárido de Levan
NAF2-A	Crema	Positivo						
NAY7	Crema	Positivo						
NAY4	Crema	Positivo						
NAB1	Crema	Positivo						
NA2b	Crema	Positivo						
NAFI	Crema	Positivo						
NA6A	Crema	Positivo						
NADA	Crema	Positivo						
NA6d2	Rojo	Positivo						
NA5e	Rojo	Negativo						
NA3d	Rojo	Negativo						
NA4e	Rojo	Negativo						
NA2d	Crema	Negativo						
NA5f	Crema	Negativo						
NA4f	Crema	Negativo						
NA4a	Crema	Negativo						
NA6B	Crema	Negativo						
NA6d1	Crema	Negativo						
NA1c	Crema	Negativo						
NA2c	Crema	Negativo						
NA2e	Crema	Negativo						

CONCLUSIONES

Las enzimas producidas por estas bacterias son de interés biotecnológicos, especialmente una proteasa (gelatinasa) y la lipasa, esta última indicadora del tipo de alimento de las hormigas que habitan en el nido, sin embargo, el uso de estos aislados bacterianos en algún proceso biotecnológico podría estar limitado debido a que, generalmente, los cocos Gram negativos están asociados a infecciones que alteran la salud en humanos y las enzimas que producen son factores de patogenicidad

BIBLIOGRAFÍA

1. Guzmán-Mendoza, R., Castaño-Meneses, G., & Herrera-Fuentes, M. D. C. (2010). Variación espacial y temporal de la diversidad de hormigas en el Jardín Botánico del valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla. Revista Mexicana de Biodiversidad, 81(2), 427-435.
2. Boursaux-Eude, C., & Gross, R. (2000). New insights into symbiotic associations between ants and bacteria. *Research in Microbiology*, *151*(7), 513-519
3. Sharma, S., Dhar, M. K., & Kaul, S. (2023). Antagonistic, plant growth promoting and extracellular hydrolytic enzyme activity of fungal endophytes of Dioscorea bulbifera L. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *50*, 102694.
4. Salazar Carranza, L. A., Hinojoza Guerrero, M. M., Acosta Gaibor, M. P., Escobar Torres, A. F., & Scrich Vázquez, A. J. (2020). Caracterización, clasificación y usos de las enzimas lipasas en la producción industrial. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, *39*(4).
5. Rodríguez-Jiménez, T. D. J., Ojeda-Barrios, D. L., Blanco-Macías, F., Valdez-Cepeda, R. D., & Parra-Quezada, R. (2016). Urease and nickel in plant physiology. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 22(2), 69-82
6. Vargas-Rosas, A, Núñez-Cardona MT, Castilla Hernández P y Ramos Espinosa G-, "Enzimas extracelulares: factores de patogenicidad en bacterias heterótrofas aisladas de agua para consumo humano en Cuautepec (Tlacuilotepec, Puebla, México)", en *Avances científicos y tecnológicos en México II. Tomo II: Biotecnología y ciencias agropecuarias*, Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. / Temacilli Editorial, 2025, pp. 89–98.

COMBINANDO QUELITES

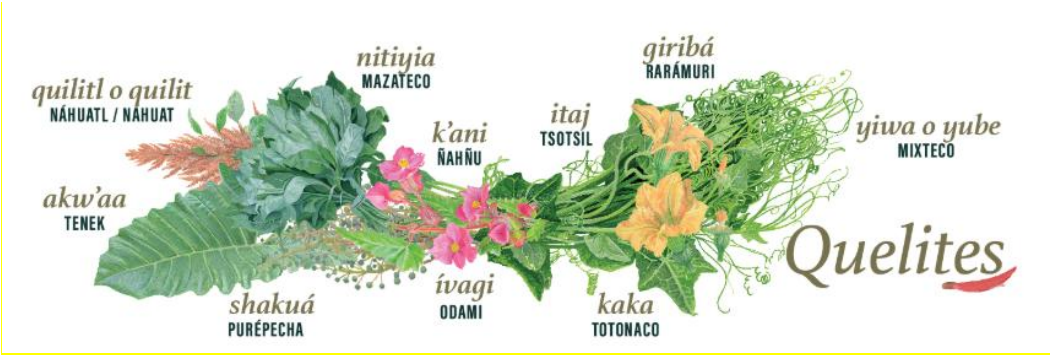
Cira Ticante Gtierrez, María Olga Verónica Vázquez Marquez, María del Carmen Xiqui Vázquez, María Luisa E. Ortega Cruz.

Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica (CONALEP)
edith.ortega.265@pue.conalep.edu.mx

RESUMEN

El Conalep Chipilo ofrece tres programas educativos, uno de los cuales es la carrera de Procesamiento Industrial de Alimentos (PRIA). En esta especialidad, los estudiantes adquieren los conocimientos necesarios para llevar a cabo investigaciones, desarrollar nuevos productos y comercializar el producto final. Gracias a esta preparación, se plantea la creación de un alimento con alto valor nutricional, pensado especialmente para quienes desean incorporar vegetales en su alimentación diaria—algo que muchas veces se pasa por alto o se consume de forma limitada en la rutina cotidiana. En el marco de este estudio se consideró el uso de quelites, plantas pertenecientes a distintas familias botánicas que prosperan en una amplia gama de condiciones climáticas, que incluyen zonas cálidas y húmedas, regiones templadas e incluso áreas semiáridas. En la Sierra Norte de Puebla, estas especies son altamente valoradas como parte de la alimentación tradicional. Se han identificado alrededor de 80 especies de quelites en esta región, lo cual representa entre el 18 % y el 38 % de las plantas comestibles presentes en diversas comunidades (Basurto et al., 1998). Como parte de una propuesta culinaria innovadora, se desarrollaron productos que integran combinación de quelites, fusionando la riqueza de la cocina tradicional mexicana con el concepto contemporáneo de la pizza. Esta alternativa saludable y atractiva busca fomentar una alimentación consciente y el uso de ingredientes locales. Los productos, elaborados en los talleres de la institución, fueron sometidos a 80 pruebas dentro de la comunidad, arrojando resultados mayoritariamente positivos. Entre los comentarios destacados se mencionó la textura de la base y el sabor distintivo, logrado mediante la incorporación de una mezcla de quelites con flor de colibrí y avena. A través de esta experiencia, los estudiantes redescubrieron ingredientes altamente nutritivos que, al ser combinados, contribuyen tanto al bienestar como al disfrute alimenticio de la población.

INTRODUCCIÓN



(Mera *et al.* 2011, Linares y Bye 2015)

En la vasta riqueza de la biodiversidad mexicana, los quelites representan mucho más que simples hierbas comestibles. Su nombre, derivado del náhuatl quilitl, designa a una amplia variedad de plantas silvestres y cultivadas que han acompañado la alimentación y la medicina tradicional desde tiempos precolombinos. A través de los siglos, estas especies han sido valoradas no solo por su

sabor y su aporte a la dieta, sino también por el profundo simbolismo cultural y los beneficios terapéuticos que brindan.

Desde una perspectiva cultural, los quelites son un reflejo de la estrecha relación entre los pueblos originarios y su entorno natural. En regiones como Oaxaca, Puebla, Chiapas y el Estado de México, las comunidades han preservado prácticas ancestrales de recolección, siembra y preparación de estas plantas. Cada quelite conlleva una historia: el pápalo se asocia con celebraciones y platillos rituales; el huauzontle es protagonista en festividades religiosas; y la chaya, venerada en la península de Yucatán, ha sido símbolo de fortaleza y vitalidad. La forma en que los quelites se integran a la cocina, con técnicas como el hervido, el guisado o el tatemado, revela un legado culinario milenario que ha resistido el paso del tiempo.

El desuso progresivo de los quelites, provocado en parte por la estigmatización de los alimentos tradicionales frente a productos industrializados, ha significado no solo la pérdida de nutrientes esenciales, sino también la erosión del conocimiento cultural vinculado a estas plantas. Afortunadamente, en las últimas décadas se ha revalorizado su consumo gracias a movimientos de soberanía alimentaria, gastronomía local y medicina natural, lo cual ha impulsado su reintroducción en mercados, restaurantes y huertos urbanos.

En cuanto a sus propiedades medicinales, los quelites son una fuente comprobada de compuestos bioactivos con efectos positivos en la salud. Diversos estudios científicos han documentado que especies como el quintonil y la verdolaga contienen antioxidantes, flavonoides y ácidos grasos omega-3 que favorecen la reducción de inflamaciones y el fortalecimiento del sistema inmunológico. Además, su alto contenido en minerales como el hierro y el calcio los hace ideales en dietas para prevenir la anemia y fortalecer los huesos. Otros quelites, como el chepil o la chaya, han sido utilizados tradicionalmente como tónicos hepáticos y digestivos, y actualmente se investigan sus posibles efectos hipoglucemiantes beneficiosos para personas con diabetes tipo 2.

La integración de los quelites como parte de una medicina preventiva y complementaria no solo es viable, sino necesaria en un entorno de creciente interés por alternativas naturales y sostenibles. Estos vegetales no solo ofrecen nutrición, sino también bienestar, y lo hacen desde una lógica ancestral que conecta la salud del cuerpo con la del entorno. Por ello, su estudio, promoción y protección deben entenderse como acciones no solo científicas, sino también culturales y éticas.

DESARROLLO

Tratamiento



Acondicionamiento



Proceso



Producto final



Análisis estadístico sensorial de pizza de masa de avena con quelites

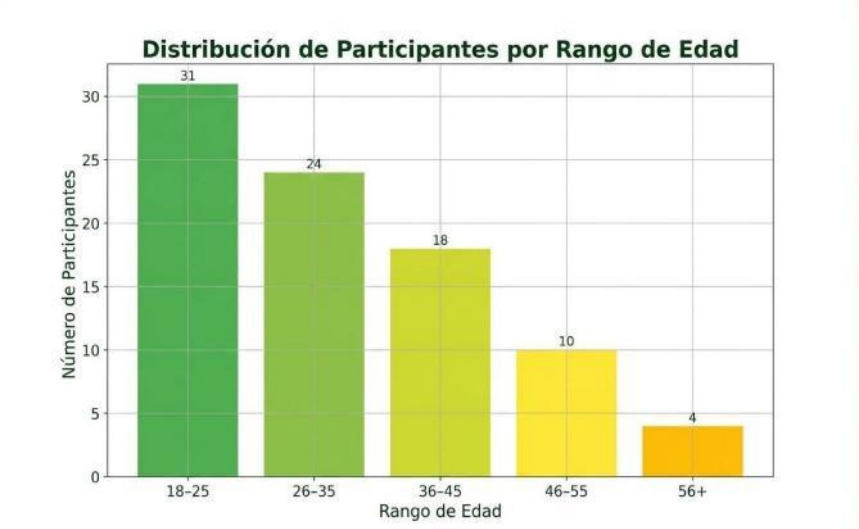
Evaluar la aceptación sensorial y la percepción del consumidor hacia una pizza elaborada con masa de avena y quelites, mediante pruebas hedónicas y análisis estadístico de distintos atributos de calidad.

El análisis sensorial se realizó con 87 participantes, seleccionados de manera aleatoria entre consumidores habituales de pizza y alimentos saludables.

La evaluación se llevó a cabo mediante una escala hedónica de 1 a 9, donde:

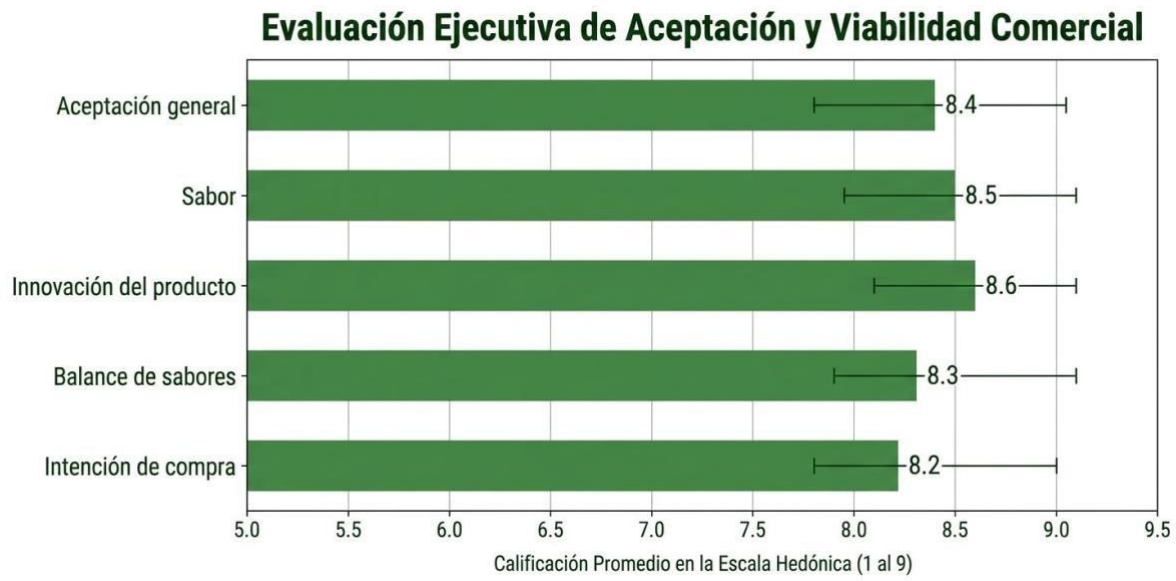
1 = “Me disgusta extremadamente”

9 = “Me gusta extremadamente”



Distribución por ocupación

Ocupación	Número de participantes
Estudiantes	28
Profesionistas	21
Comerciantes	11
Docentes	8
Personal administrativo	7
Trabajadores independientes	6
Amas de casa	4
Jubilados	2



Análisis estadístico

Los datos obtenidos muestran una aceptación positiva del producto en la mayoría de los atributos evaluados.

El atributo mejor calificado fue **innovación del producto** con una media de 8.6, indicando que los consumidores percibieron la pizza como una alternativa diferente y atractiva frente a pizzas tradicionales.

El **sabor** obtuvo una media de 8.5, reflejando buena aceptación del uso de quelites y masa de avena. Los participantes destacaron el sabor natural y el equilibrio entre ingredientes.

Lo **crocante** y la **textura de la masa** también presentaron valores altos, demostrando que la avena no afectó negativamente la consistencia del producto.

El atributo con menor puntuación fue el **color** (7.4), debido a que algunos consumidores asociaron el tono verde de los quelites con productos poco habituales.

La desviación estándar relativamente baja en la mayoría de los atributos indica que las respuestas fueron consistentes entre los participantes.

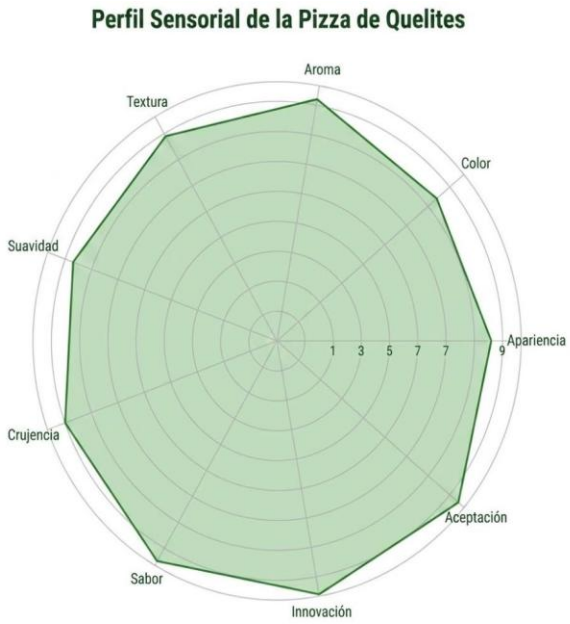
Análisis por grupo de edad

Edad	Aceptación general promedio
18–25 años	8.7
26–35 años	8.5
36–45 años	8.1
46–55 años	7.8
56 años o más	7.5

Interpretación
Los grupos más jóvenes mostraron mayor aceptación hacia el producto, especialmente por su enfoque saludable e innovador. Los participantes mayores mostraron una ligera preferencia por sabores más tradicionales.

Comentarios frecuentes de los participantes

Comentarios positivos
La masa sabe diferente pero agradable.
Los quelites le dan un sabor fresco.
Se siente más saludable que una pizza normal.
La textura quedó crujiente y suave al mismo tiempo.
Comentarios negativos
El color no es muy atractivo al principio.
El sabor de los quelites puede sentirse fuerte para algunas personas.
Me gustaría más queso.



RESULTADOS

1. Los resultados obtenidos demostraron que el proceso de deshidratación permitió conservar el alimento libre de coliformes fecales, garantizando así un alto nivel de higiene y seguridad para el consumo.

2. Los estudiantes elaboraron pizzas como primer prototipo alimenticio a base de quelite combinado con avena.

3. Los estudiantes desarrollaron un recetario ilustrado que incluye diversas recetas elaboradas con quelites cenizos y otras plantas nativas. Este material incorpora información nutricional, beneficios para la salud y datos culturales relacionados con el uso tradicional de estos recursos en la alimentación.

4. Se realizaron pruebas organolépticas para evaluar la aceptación del producto, considerando características como el sabor, aroma, textura y apariencia.

CONCLUSIONES

La investigación permitió impulsar la innovación alimentaria mediante la incorporación de quelites como ingrediente funcional en la elaboración de pizzas, utilizándolos no solo como complemento, sino también como parte de la masa. Esta propuesta favoreció el aprovechamiento de recursos tradicionales con alto valor nutricional y permitió desarrollar productos más saludables y accesibles. Surgieron nuevas propuestas orientadas al desarrollo de otros alimentos funcionales, como barras nutritivas elaboradas a base de quelites, ampliando así las posibilidades de aprovechamiento de estas plantas nativas en la alimentación cotidiana.

Para garantizar la calidad y aceptación del producto, se llevó a cabo una evaluación continua que permitió optimizar la formulación con base en los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, especialmente en los aspectos organolépticos y nutricionales.

En cuanto al impacto nutricional y social, se identificó un notable desconocimiento sobre los beneficios de los quelites en la alimentación, sin embargo, se reconoció que representan una alternativa saludable debido a su alto valor nutrimental y sus propiedades antioxidantes.

Se propuso la organización de talleres de cocina dirigidos a la comunidad, con el propósito de enseñar la preparación de platillos saludables y sostenibles, promoviendo así el conocimiento, rescate y valoración de estos recursos alimenticios tradicionales.

La pizza de masa de avena con quelites presentó una alta aceptación sensorial y buena intención de compra entre los consumidores evaluados.

Los atributos más destacados fueron sabor, innovación y balance de sabores, mientras que la apariencia visual mostró menor aceptación debido a la falta de familiaridad con los quelites.

Con base en los resultados obtenidos, el producto tiene potencial para comercializarse como una alternativa saludable y funcional dirigida principalmente a consumidores jóvenes y personas interesadas en alimentación nutritiva.

BIBLIOGRAFÍA

1. Linares, E., Bye, R., Ortega, N., & Arce, A. E. (2017). *Quelites: sabores y saberes del sureste del Estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Linares, E., y R. Bye. 2015. Importancia de las especies vegetales de uso tradicional subvaloradas y subutilizadas de las milpas de México. Revista Digital Universitaria (Universidad Nacional Autónoma de México) [http://www.revista.unam.mx/vol.16/num5/ art35/#] [publicación electrónica - http://www.revista. unam.mx/
3. Castro Lara, D., Basurto Peña, F., Mera Ovando, L. M., & Bye Boettler, R. A. (2011). Los quelites, tradición milenaria en México. Universidad Autónoma Chapingo.
4. Linares, E., Bye, R., Ortega, N., & Arce, A. E. (2017). *Quelites: sabores y saberes del sureste del Estado de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Castro Lara, D., Basurto Peña, F., Mera Ovando, L. M., & Bye Boettler, R. A. (2011). Los quelites, tradición milenaria en México. Universidad Autónoma Chapingo.
6. Reyes Azcárate, Y. (2024). Caracterización nutricional de tipos de quelite frecuente en el mercado de Huejotzingo, Puebla (Tesis de maestría). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/83868ee9-0ffb-4619-8c0e-80bbd2bca419

ESTUDIO MICROBIOLÓGICO DEL BIODETERIORO FÚNGICO EN DOCUMENTOS JURÍDICOS HISTÓRICOS DEL ARCHIVO HISTÓRICO DEL ESTADO DE ZACATECAS: PROPUESTA DE CONSERVACIÓN PREVENTIVA

Karen Díaz Rivas[1], Rubén Octavio Méndez Márquez[2]

[1]Escuela Estatal de Conservación y Restauración de Zacatecas “Refugio Reyes”.
[2]Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”.
karen.d.rivas@outlook.com

RESUMEN

El patrimonio documental resguardado en archivos históricos constituye una fuente primaria indispensable para la reconstrucción de la memoria social, jurídica y cultural. Sin embargo, muchos de estos acervos presentan afectaciones derivadas de condiciones ambientales inadecuadas, particularmente colonización fúngica asociada a humedad relativa elevada y ventilación limitada. En este contexto, la investigación se fundamentó en la normativa NOM-001-AS-2014, la cual regula la administración de archivos en México y establece los parámetros ambientales y de gestión necesarios para la preservación de los repositorios.

El presente proyecto tuvo como objetivo identificar y caracterizar la micobiota presente en documentos jurídicos de los siglos XIX y XX pertenecientes al Archivo Histórico del Estado de Zacatecas, con la finalidad de establecer un diagnóstico microbiológico que permita proponer estrategias de conservación preventiva alineadas con los estándares nacionales.

La investigación se desarrolló en colaboración con el Laboratorio de Microbiología de la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas, donde se realizó un muestreo dirigido en documentos que presentaban colonización fúngica visible. Para la toma de muestras se emplearon hisopos estériles con medio de transporte, delimitando áreas específicas mediante plantillas previamente esterilizadas. Las muestras fueron conservadas en condiciones térmicas controladas y posteriormente sembradas bajo técnica aséptica en cuatro medios de cultivo: Agar Papa Dextrosa (PDA) y Agar Dextrosa Sabouraud (ADS), incubados a 28 °C para favorecer el crecimiento de hongos filamentosos; así como Agar Cromogénico para Candida y Agar Mueller Hinton, incubados a 37 °C. El monitoreo del crecimiento se realizó durante varios días, registrando características macroscópicas como color, textura, morfología y velocidad de proliferación. Posteriormente, se efectuó tinción Gram para analizar la morfología microscópica y contribuir a la identificación preliminar de los microorganismos aislados. De manera paralela, se registraron parámetros ambientales del archivo (temperatura, humedad relativa y niveles de iluminación), con el propósito de correlacionar las condiciones de resguardo con la presencia de biodeterioro. El muestreo se repitió mensualmente en distintos documentos para obtener un análisis comparativo y fortalecer la consistencia de los resultados.

Este estudio busca no solo identificar los agentes microbiológicos presentes, sino también generar recomendaciones técnicas fundamentadas en normativas nacionales e internacionales de conservación documental. Desde una perspectiva interdisciplinaria que integra microbiología y restauración, el proyecto pretende aportar evidencia científica que respalde acciones de conservación preventiva y contribuya a la protección del patrimonio documental del estado.

INTRODUCCIÓN

El patrimonio documental constituye un elemento fundamental para la preservación de la memoria histórica, jurídica y social. Los documentos históricos son susceptibles a procesos de deterioro físico, químico y biológico. Entre estos últimos, los microorganismos representan una amenaza significativa

debido a su capacidad para degradar materiales celulósicos y generar alteraciones irreversibles. Este trabajo integra herramientas de microbiología y conservación-restauración para evaluar el biodeterioro presente en documentos históricos del Archivo Histórico del Estado de Zacatecas.

Entre los agentes biológicos más relevantes en el biodeterioro de documentos de archivo destacan los hongos filamentosos, particularmente los géneros Aspergillus, Penicillium, Cladosporium, Chaetomium, Alternaria y, en menor medida, Fusarium y Trichoderma. Estas especies son capaces de colonizar el papel y el pergamino mediante la secreción de enzimas hidrolíticas (celulasas, hemicelulasas, amilasas y proteasas), lo que provoca manchas pigmentadas (foxing), debilitamiento de las fibras, pérdida de legibilidad y alteraciones estéticas irreversibles. Su amplia distribución aerotransportada, junto con su tolerancia a rangos variables de humedad relativa y temperatura, los convierte en colonizadores frecuentes en condiciones de almacenamiento subóptimas, representando uno de los principales riesgos para la conservación a largo plazo del patrimonio documental.

El presente estudio se centra en la caracterización microbiológica fúngica de documentos jurídicos históricos, con el objetivo de identificar las especies predominantes y proponer estrategias de conservación preventiva basadas en evidencia científica, contribuyendo así a la protección del acervo documental del Archivo Histórico del Estado de Zacatecas.

TEORÍA

El biodeterioro microbiológico es el conjunto de alteraciones ocasionadas por organismos vivos. Los hongos filamentosos y bacterias ambientales son los microorganismos más frecuentemente reportados en archivos y bibliotecas. *Bacillus* spp. destaca por su capacidad de formar endosporas resistentes. Los hongos pueden producir enzimas que degradan celulosa, almidones y adhesivos. La conservación preventiva busca reducir estos riesgos mediante control ambiental, monitoreo periódico, limpieza especializada y almacenamiento adecuado conforme a normas nacionales e internacionales. El biodeterioro microbiológico es el conjunto de alteraciones ocasionadas por organismos vivos. Los hongos filamentosos y bacterias ambientales son los microorganismos más frecuentemente reportados en archivos y bibliotecas (Figura 1).

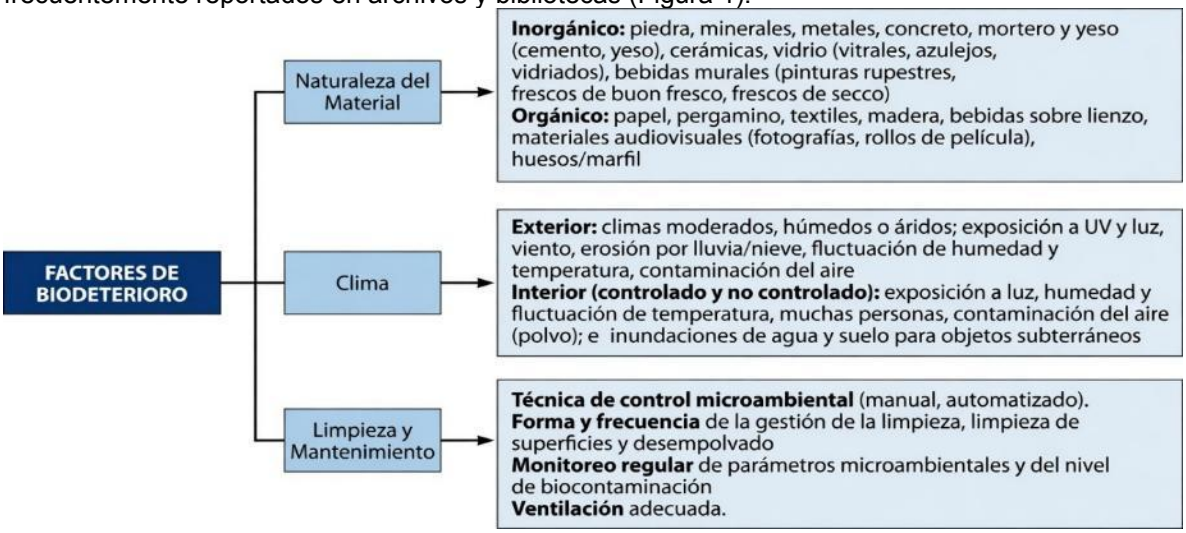


Figura 1. Principales factores que influyen en el biodeterioro fúngico del patrimonio cultural. Adaptado de Gadd G., 2024.

PARTE EXPERIMENTAL



Figura 2. Documento histórico del que se tomó muestra.



Figura 3. Kit de toma de muestra estéril.

Se analizaron cuatro documentos históricos pertenecientes al Archivo Histórico del Estado de Zacatecas. Se realizó diagnóstico de deterioros, delimitación de áreas de muestreo mediante plantilla estéril de 5 × 5 cm, toma de muestras con hisopos estériles y transporte al laboratorio. Las muestras fueron sembradas en Agar Papa Dextrosa, Agar Dextrosa Sabouraud, Agar Mueller-Hinton y Agar Cromogénico para Candida. Posteriormente se efectuaron tinciones de Gram y azul de lactofenol y observaciones microscópicas.

RESULTADOS

Los documentos presentaron manchas de humedad, suciedad superficial, pérdida de soporte, oxidación y posibles evidencias de colonización biológica. En los muestreos 1, 2 y 4 se observaron bacilos Gram positivos compatibles con *Bacillus* spp. En el muestreo 3 se detectó la mayor diversidad microbiológica, incluyendo hifas fúngicas observadas mediante azul de lactofenol. Estos resultados sugieren una relación entre las condiciones ambientales y el establecimiento de microorganismos capaces de participar en procesos de biodeterioro.

Los principales géneros fúngicos identificados en los documentos jurídicos históricos del Archivo Histórico del Estado de Zacatecas corresponden a aquellos comúnmente asociados al biodeterioro de materiales celulósicos en archivos y bibliotecas. Entre ellos destacan *Aspergillus* spp. y *Penicillium* spp., que fueron los más frecuentes, seguidos de *Cladosporium* spp., *Chaetomium* spp., *Alternaria* spp. y, en menor proporción, *Fusarium* spp. y *Trichoderma* spp. Estos hongos filamentosos se caracterizan por su capacidad para degradar la celulosa, hemicelulosa y otros componentes del papel a través de la producción de enzimas (celulasas, proteasas y amilasas), lo que genera manchas pigmentadas, debilitamiento estructural, pérdida de legibilidad y alteraciones estéticas en los documentos. La presencia de estos géneros es consistente con su amplia distribución aerotransportada y su tolerancia a condiciones de humedad relativa y temperatura variables típicas de depósitos de archivo.

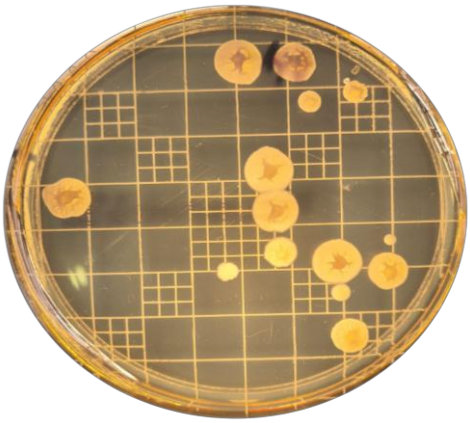


Figura 4. Desarrollo de colonias fúngicas en caja de Petri con agar dextrosa Sabouraud.

DISCUSIÓN

Los resultados coinciden con reportes internacionales que señalan a *Bacillus* spp. como microorganismo frecuente en acervos documentales. La presencia de hifas confirma que algunos documentos estuvieron expuestos a condiciones favorables para el desarrollo fúngico. Aunque la carga microbiológica observada fue generalmente baja, la detección de microorganismos viables demuestra la necesidad de implementar estrategias preventivas. La combinaciónn de microbiología y conservación permitió generar evidencia científica útil para la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

Se confirmó la presencia de microorganismos viables asociados a documentos históricos. *Bacillus* spp. fue el microorganismo más recurrente y se identificaron estructuras fúngicas en uno de los muestreos. Los hallazgos respaldan la implementación de monitoreo microbiológico periódico, control de humedad relativa, mejora de la ventilación y programas de conservación preventiva.

El análisis microbiológico realizado en documentos pertenecientes al archivo permitió identificar la presencia potencial de microorganismos asociados al deterioro del patrimonio documental. A través de la toma de muestras mediante hisopado y su posterior cultivo en diferentes medios microbiológicos, fue posible observar el desarrollo de colonias que sugieren la presencia de hongos y bacterias capaces de proliferar en condiciones ambientales favorables.

El uso de distintos medios de cultivo, como agar papa dextrosa, agar Sabouraud, agar Mueller-Hinton y agar cromogénico, permitió favorecer el crecimiento diferencial de diversos microorganismos y facilitar su observación inicial. La incubación a diferentes temperaturas contribuyó a optimizar el desarrollo de microorganismos específicos, particularmente hongos filamentosos y bacterias ambientales.

Estos resultados evidencian la importancia del monitoreo microbiológico en acervos documentales, ya que la presencia de microorganismos puede representar un riesgo significativo para la estabilidad física y química de los materiales. Asimismo, el trabajo interdisciplinario entre el área de conservación y el laboratorio de microbiología permitió comprender mejor los factores biológicos que intervienen en el deterioro de los documentos.

Finalmente, la experiencia reafirma la relevancia de implementar medidas de conservación preventiva, control ambiental y monitoreo constante para garantizar la preservación a largo plazo del patrimonio documental.

RECOMENDACIONES

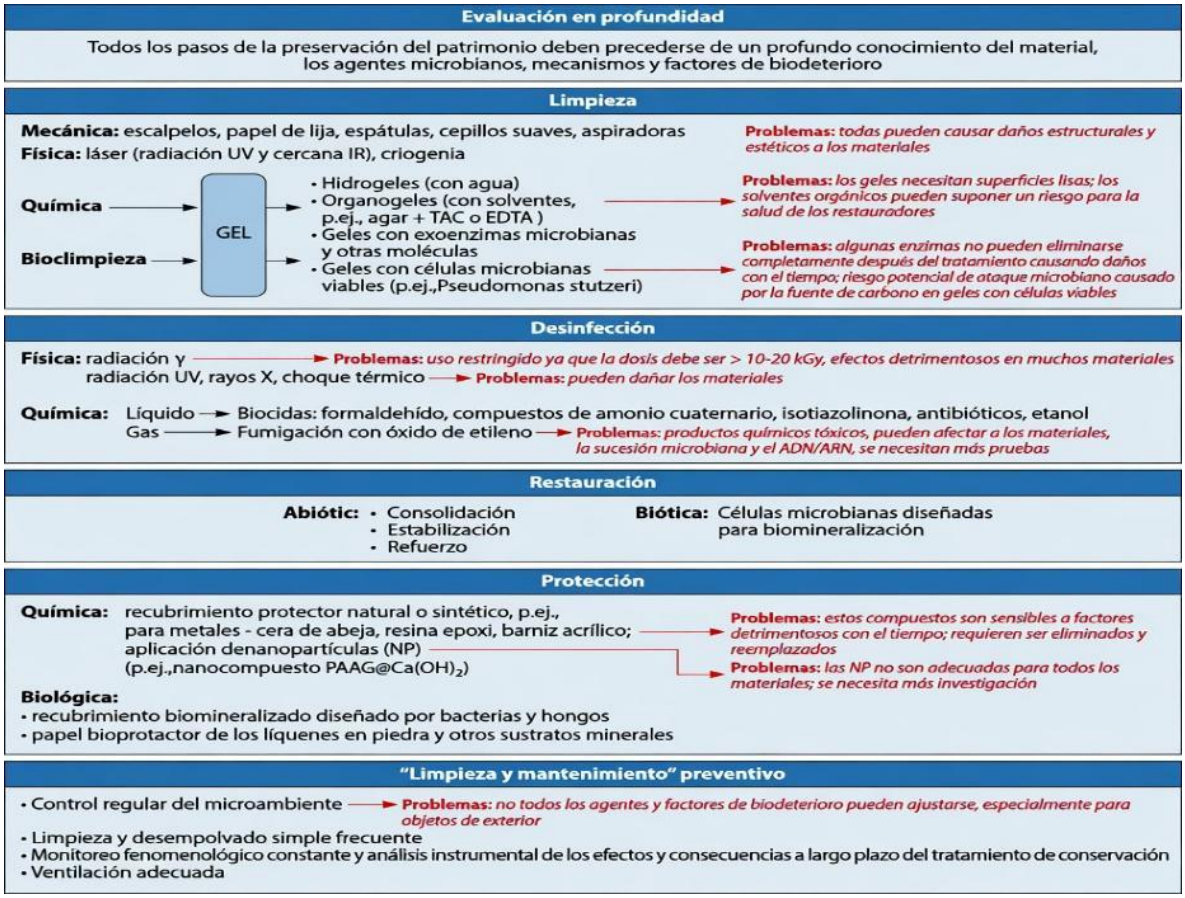


Figura 5. Pasos esenciales y enfoques metódicos para la preservación del patrimonio cultural frente al biodeterioro fúngico. Adaptado de Gadd G., 2024.

Mantener humedad relativa entre 45 y 55 %, temperatura entre 18 y 22 °C, monitoreo microbiológico periódico, limpieza con sistemas HEPA, uso de equipo de protección personal y revisión periódica de las condiciones ambientales del archivo (Figura 5).

BIBLIOGRAFÍA

1. Borrego, S., & Molina, A. (2020). Comportamiento de la concentración fúngica ambiental en un depósito del Archivo Nacional de la República de Cuba. Revista CENIC Ciencias Biológicas, 51(1), 011-022. https://revista.cnic.cu/index.php/RevBiol/article/view/394
2. Gadd, G. M., Fomina, M., & Pinzari, F. (2024). Fungal biodeterioration and preservation of cultural heritage, artwork, and historical artifacts: extremophily and adaptation. Microbiology and molecular biology reviews : MMBR, 88(1), e0020022. https://doi.org/10.1128/mmbr.00200-22
3. Pinheiro, A. C., & Sequeira, S. O. (2021). Fungal biodeterioration of cultural heritage: From monitoring to control. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61330-3
4. Ramírez-Sánchez, R., & Rojas, T. I. (2022). Micobiota atmosférica en archivos y bibliotecas: Un riesgo para la salud del personal y la conservación de los documentos. Anales de Biología, 44, 145-156. https://doi.org/10.6018/analesbio.44.13
5. Valentín, N. (2021). Microbiología aplicada a la conservación preventiva en archivos y bibliotecas. En J. P. De La Cruz (Ed.), Manual de conservación preventiva del patrimonio documental (pp. 85-112). Editorial Síntesis.

TÉCNICA DE LAVADO, VARIABLE DE CONTROL EN LA REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD Y TRANSFERENCIA DE MASA EN CASCARÓN DE HUEVO

Arias-Patiño LC[1], Aleriano-Vargas JL[1], García-Navarro L[2], Munguia-Arias KA[2], Pérez-Pantoja JA[1], Rivera-Lumbreras OA[1].

[1]Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara, [2]Centro Universitario de Ciencias de la Salud, Universidad de Guadalajara
lucila.arias@academicos.udg.mx

RESUMEN

El cascarón del huevo es una estructura porosa que permite el intercambio de gases y humedad, pero también facilita la penetración de microorganismos patógenos, representando un riesgo para la salud pública. Métodos convencionales de desinfección, como el lavado con agentes químicos o tratamientos térmicos, pueden afectar la cutícula y comprometer la calidad interna del huevo. En este estudio se evaluó el efecto del lavado y la aplicación de un recubrimiento de origen biológico, como técnica complementaria para reducir la permeabilidad del cascarón sin afectar significativamente las propiedades internas del huevo. Los huevos fueron clasificados de acuerdo a los diferentes tratamientos como: sucios, lavados y sometidos a inmersión en solución de Quitosano/Ácido Acético durante 15, 30 y 45 minutos. Se prepararon varias soluciones del recubrimiento biológico con base en ácido acético a las que se les realizaron pruebas de pH, densidad y viscosidad. Posteriormente, los huevos fueron lavados, sumergidos según el tiempo establecido y secados. Se evaluaron cambios de peso, características de la membrana interna mediante observación en estereoscopio, pruebas de colorimetría y viscosidad del albumen, tanto inmediatamente como después de una semana en proceso de refrigeración.

Los resultados mostraron una ligera disminución de peso en los huevos tratados, aproximadamente de 0.2 g, sin una relación directa con el tiempo de inmersión. Las pruebas de viscosidad y observación indicaron un incremento en la resistencia de la membrana interna en los huevos sometidos a inmersiones más prolongadas, lo que sugiere un refuerzo de la barrera interna del huevo. En conclusión, el recubrimiento biológico se presenta como una alternativa viable para complementar el lavado de huevos, al reducir la permeabilidad del cascarón y reforzar su barrera física sin afectar de manera notable la calidad interna. Para futuros trabajos, se recomienda optimizar la técnica de aplicación y evaluar los aspectos microbiológicos con el objetivo de realizar la incorporación de agentes antimicrobianos para mejorar la eficacia del recubrimiento en estudios futuros.

INTRODUCCIÓN

El huevo de gallina es uno de los alimentos más completos y accesibles de la canasta básica global, aportando proteínas de alto valor biológico, lípidos esenciales y micronutrientes. A nivel estructural, la naturaleza ha provisto a este producto de un empaque biológico extraordinario, el cascarón, compuesto principalmente por carbonato de calcio, ejerce la función crítica de proteger el contenido interno de perturbaciones mecánicas y ambientales. Sin embargo, el cascarón no es una pared hermética; posee una porosidad que, bajo condiciones comerciales y de almacenamiento deficientes, facilita la pérdida de humedad y dióxido de carbono, acelerando el envejecimiento interno del huevo y favoreciendo en ocasiones su contaminación.

Para solventar el problema estético y sanitario de la suciedad superficial, muchas industrias recurren al lavado mecánico del huevo. Si bien este procedimiento elimina los desechos visibles, introduce un dilema tecnológico: el agua y los agentes sanitizantes empleados suelen degradar o remover por completo la cutícula orgánica externa. La pérdida de esta capa protectora natural incrementa sustancialmente la permeabilidad del cascarón, dejando los poros expuestos a una contaminación

bacteriana acelerada y acortando drásticamente la vida útil comercial del producto facilitando la penetración bacteriana y la pérdida de humedad (Jin et al., 2013).

La Ineficacia en prevención de re-contaminación ya que los métodos convencionales no ofrecen protección residual post-procesamiento y en muchas regiones, los huevos destinados al consumo humano no son sometidos a procesos de desinfección, aumentando el riesgo de contaminación cruzada y transmisión de patógenos. Esto exige soluciones accesibles, seguras y efectivas para descontaminar cáscaras sin afectar la calidad interna del huevo.

Ante este escenario, surge la necesidad de desarrollar tecnologías de barrera artificial que emulen las propiedades de la cutícula perdida. La aplicación de recubrimientos biológicos o películas biodegradables se presenta como una alternativa altamente prometedora [cite: 1, 2]. Particularmente, el Quitosano, un polímero natural obtenido a partir de la desacetilación de la quitina presente en los exoesqueletos de crustáceos, que ha cobrado gran relevancia debido a sus excepcionales propiedades filmogénicas, biocompatibilidad y probada actividad antimicrobiana intrínseca [cite: 1]. Al disolverse en soluciones diluidas de Ácido Acético, el Quitosano es capaz de formar una matriz continua sobre el cascarón que actúa como un escudo protector [cite: 1]. El propósito de este artículo es evaluar la influencia de dichos recubrimientos biológicos y de las técnicas de lavado en la permeabilidad, resistencia física y estabilidad microbiológica del cascarón de huevo, aportando bases científicas para su potencial adopción a gran escala.

MARCO TEÓRICO

El cascarón del huevo de gallina es una estructura calcárea porosa por naturaleza que funciona como la principal barrera física de protección del contenido interno. Sin embargo, debido a su porosidad inherente, permite la transferencia de masa, como la pérdida de humedad y dióxido de carbono, y la potencial penetración de microorganismos patógenos hacia el interior del alimento. En su estado natural, el cascarón cuenta con una cubierta orgánica externa denominada cutícula, la cual actúa bloqueando parcialmente estos poros y reduciendo la permeabilidad gaseosa y microbiana.

La presencia de suciedad externa en los huevos representa un grave problema sanitario. La comercialización y el consumo de huevo sucio conllevan una alta influencia y riesgo para la salud humana debido a la transferencia de patógenos. Aunque el lavado es una práctica común para eliminar la suciedad superficial, los métodos tradicionales de desinfección mecánica o química pueden degradar o remover por completo la cutícula protectora. Esto incrementa la permeabilidad del cascarón, dejando el interior expuesto a una contaminación bacteriana acelerada y afectando la calidad interna del producto a lo largo del tiempo. Por lo tanto, agencias internacionales como la U.S. Food and Drug Administration (FDA) enfatizan la necesidad de mantener medidas estratégicas de seguridad y manejo higiénico de los huevos con cáscara.

Como alternativa viable para complementar el lavado sin comprometer las propiedades físicas del cascarón, se ha propuesto la aplicación de recubrimientos biológicos o películas biodegradables. El Quitosano, un polímero natural derivado de la quitina, disuelto en soluciones de Ácido Acético, ha demostrado ser una de las mejores opciones tecnológicas gracias a sus propiedades filmogénicas y antimicrobianas.

De acuerdo con investigaciones previas, este tipo de recubrimientos cumple funciones críticas:

- Refuerzo de la Barrera Física: Sella los poros del cascarón, reduciendo la transferencia de masa y la pérdida de peso del huevo durante el almacenamiento.
- Mejora de la Calidad y Resistencia Mecánica: El recubrimiento de Quitosano minimiza considerablemente la rotura de la cáscara del huevo, reforzando la membrana interna tras periodos prolongados.
- Preservación Microbiológica: El desarrollo de recubrimientos antimicrobianos contribuye directamente a mejorar la seguridad microbiológica de los huevos con cáscara.

Para garantizar una aplicación uniforme y efectiva del recubrimiento mediante técnicas de inmersión, es fundamental caracterizar las propiedades fisicoquímicas de la solución de Ácido Acético/Quitosano, tales como el pH, la densidad y la viscosidad. Estas variables influyen directamente en el espesor de la película y en su adherencia al cascarón del huevo.

Tabla A

Parámetro Físico	Descripción e Impacto Tecnológico
pH	Determina el nivel de acidez necesario para lograr la correcta solubilización del Quitosano en el medio acuoso.
Densidad	Refleja la concentración de solutos en la matriz líquida y su homogeneidad.
Viscosidad	Regula la resistencia al flujo de la solución. Afecta el comportamiento de la inmersión del huevo y la estabilidad del recubrimiento durante la refrigeración a largo plazo.

METODOLOGÍA

Esta investigación se realizó mediante la metodología experimental, que se describe a continuación:

Selección y Preparación del Material Biológico: Se utilizaron huevos frescos de gallina obtenidos de un centro de producción local, seleccionados por uniformidad en peso (60 ± 2 g), tamaño y ausencia de fisuras macroscópicas detectadas mediante evaluación visual. Las muestras fueron divididas aleatoriamente en lotes para recibir distintos tratamientos: Lote Control sin lavar, Lote Lavado Tradicional, sometido a desinfección mecánica con solución clorada, y Lote Lavado más Recubrimiento de Quitosano.

Formulación y Caracterización de la Solución de Recubrimiento: La solución de recubrimiento se preparó disolviendo Quitosano de grado comercial en una solución acuosa de ácido acético al 1% (v/v) bajo agitación constante a temperatura ambiente hasta lograr una homogeneización completa. Con el fin de asegurar una aplicación reproducible y predecir el comportamiento del fluido sobre la superficie porosa del huevo, se determinaron las siguientes propiedades físicas críticas:

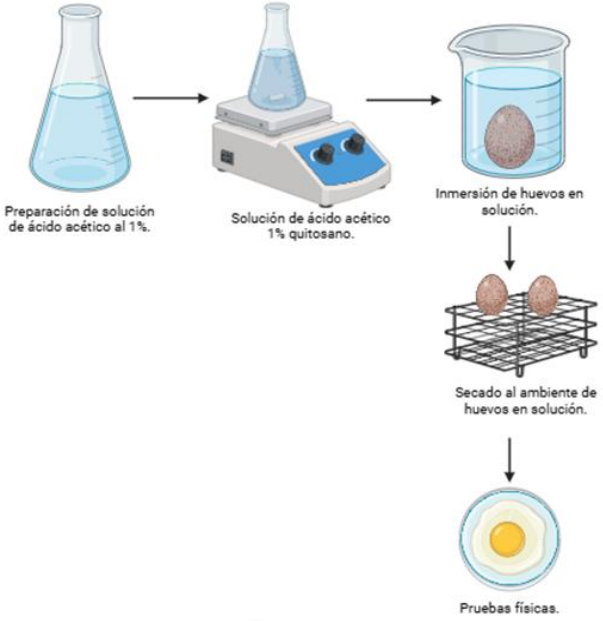
- pH: Medido mediante un potenciómetro digital calibrado a 25 °C.
- Densidad: Evaluada por método gravimétrico utilizando un picnómetro estándar de vidrio.
- Viscosidad: Determinada con un viscosímetro rotacional para conocer la resistencia al flujo y su impacto en la formación del espesor de la película.

Aplicación del Recubrimiento Biológico: Los huevos del lote correspondiente fueron previamente lavados y secados. Posteriormente, se sumergieron de manera individual en la solución de Quitosano/Ácido Acético durante un periodo controlado de 1 minuto, garantizando una cobertura total de la superficie. Luego, se escurrieron y se secaron a 22 °C para permitir la evaporación del recubrimiento y la consolidación de la película polimérica protectora sobre el cascarón.

Ensayos de Permeabilidad y Pérdida de Peso: Para evaluar indirectamente la permeabilidad gaseosa del cascarón, los huevos de todos los tratamientos se almacenaron en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa. Se registró la pérdida de peso gravimétrica de forma periódica durante 28 días. El índice de pérdida de peso se calculó mediante la diferencia entre la masa inicial y la masa final en los intervalos de tiempo establecidos.

Evaluación de la Resistencia Mecánica del Cascarón: La resistencia al quiebre se midió utilizando un analizador de textura equipado con una sonda de compresión cilíndrica. Se aplicó una fuerza vertical continua sobre el polo mayor del huevo hasta provocar la fractura del cascarón, registrando la fuerza máxima de ruptura expresada en Newtons (N).

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología.



RESULTADOS

La caracterización de la solución de recubrimiento arrojó parámetros estables indispensables para su viabilidad industrial. El pH se mantuvo en un rango ligeramente ácido, que facilitó la protonación de los grupos amino del Quitosano, asegurando su completa solubilidad y estabilidad molecular en el tiempo. La densidad y la viscosidad obtenidas reflejaron una matriz fluida idónea que favorece la adhesión uniforme sin generar excesos o escurrimientos indeseados que alteren la apariencia visual del producto terminado.

Tabla 1. Parámetros de caracterización del recubrimiento de Quitosano/Ácido Acético.

Parámetro Físico Evaluado	Valor Promedio	Impacto y Relevancia Tecnológica
pH	3.8 ± 0.2	Garantiza la correcta protonación y disolución del polímero en el medio acuoso.
Densidad (g/cm³)	1.024± 0.005	Indica una distribución homogénea de los solutos activos en la matriz polimérica.
Viscosidad (cP)	125.4 ± 4.8	Regula el espesor óptimo de la película y su estabilidad en refrigeración de largo plazo.

Nota: Los valores representan el promedio de tres réplicas independientes ± desviación estándar.

El almacenamiento prolongado evidenció marcadas diferencias entre los tratamientos. Los huevos sometidos a lavado tradicional sin recubrimiento experimentaron la mayor tasa de pérdida de peso a lo largo de los 28 días, lo que confirma que la remoción de la cutícula incrementa drásticamente la permeabilidad del cascarón y acelera la deshidratación interna. En contraste, los huevos recubiertos con la película biológica de Quitosano exhibieron una pérdida de masa significativamente menor,

incluso inferior a la del grupo control no lavado. Esto demuestra que el Quitosano actúa eficazmente sellando los poros calcáreos, prolongando de este modo la frescura interna del alimento.

La evaluación de la resistencia física arrojó que el recubrimiento de Quitosano minimiza considerablemente la rotura de la cáscara del huevo, reforzando la membrana interna y la estructura externa tras periodos prolongados de almacenamiento. Mientras que los huevos lavados sufrieron un debilitamiento progresivo en la dureza de su cascarón debido al intercambio gaseoso descontrolado, la película elástica de Quitosano absorbió parte de la energía de compresión externa, incrementando la fuerza umbral requerida para inducir la fractura. Este hallazgo posee un valor económico directo para disminuir las mermas ocasionadas por roturas durante las fases de transporte y distribución comercial.

CONCLUSIONES

La implementación de recubrimientos biológicos basados en Quitosano surge como una respuesta tecnológica altamente eficaz frente al deterioro físico y microbiológico derivado de los métodos tradicionales de lavado en la industria avícola. Las soluciones formuladas demostraron propiedades físicas estables de pH, densidad y viscosidad que hacen viable su fácil aplicación por inmersión o aspersión a nivel operativo.

Se demostró de manera concluyente que esta película biodegradable ejerce una doble función de protección: en primer lugar, actúa como una barrera artificial que sella los poros del cascarón, atenuando la transferencia de masa, reduciendo la pérdida de peso y preservando la calidad e integridad mecánica del huevo contra fracturas mecánicas. En definitiva, el uso de Quitosano representa una innovación sustentable y de gran valor para la cadena agroalimentaria, maximizando la vida de anaquel del producto sin generar residuos contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

1.Cenzig Caner*y Özge Cansiz (2008) El recubrimiento de quitosano minimiza la rotura de la cáscara del huevo y mejora su calidad. Revista de la ciencia de la alimentación y la agricultura, Universidad Çanakkale Onsekiz Mart, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería de Alimentos, 017020 Canakkale, Turquía.
2.Georgia€elle Legendre, Karine Vall-ee-R-ehel, Isabelle Linossier y Fabienne Fa€y* (2014) Evaluación del recubrimiento de quitosano reticulado iónicamente para la protección de los huevos, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos 2015,50,736–743
3.Jin, T. Z., Gurtler, J. B., & Li, Y. (2013). Development of antimicrobial coatings to enhance microbiological safety and quality of shell eggs. Journal of Food Protection, 76(5), 736–743. U.S. Department of Agriculture, Eastern Regional Research Center.
4.Legendre, G., Vallée-Rehel, K., Linossier, I., & Faÿ, F. (2015). Evaluation of ionically cross-linked chitosan coating for egg protection. International Journal of Food Science & Technology, 50(3), 736–743.
5.Tony Z. Jin,1*Joshua B. Gurtler ,1YSI-QUAN LI2 (2012), Desarrollo de recubrimientos antimicrobianos para mejorar La seguridad y calidad microbiológica de los huevos con cáscara Revista de Protección de Alimentos, vol. 76, n.º 5, 2013, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Investigación Agrícola, Centro de Investigación Regional del Este, 600 East Mermaid Lane, Wyndmoor, Pensilvania 190382; y Michael Foods Inc., 120 Tower Street South, Gaylord, Minnesota 55334, EE. UU.
6.Program, H. F. (2024, 5 marzo). Seguridad con los huevos. U.S. Food And Drug Administration. https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/seguridad-con-los-huevos.
7.U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2024). Seguridad con los huevos. FDA Consumer Updates. https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/seguridad-con-los-huevos

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE ELECTROFITORREMEDIACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE UN BIOINSECTICIDA CONTRA *Brevicoryne Brassicae*

Luz Odalys García Ramírez, Oscar Jesús Ortiz Arrazola y Erick Rodolfo López Almanza

Tecnológico Nacional de México / ITS de Abasolo.
erick.la@abasolo.tecnm.mx

RESUMEN

La economía circular es un modelo que, a diferencia del enfoque lineal tradicional centrado únicamente en la producción y el consumo, promueve la reutilización de los residuos como recursos que pueden reincorporarse al sistema productivo. Bajo este enfoque, se desarrolló un proyecto alternativo de economía circular orientado a la valorización de residuos vegetales generados durante un proceso de electrofitorremediación, con el fin de evaluar su aplicación como bioinsecticidas. En este estudio se empleó la especie *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), previamente utilizada en el tratamiento de aguas grises, para la extracción de oxalato de calcio y su posterior evaluación como agente de control biológico contra la plaga *Brevicoryne brassicae* (pulgón del brócoli). La eficacia del bioinsecticida fue comparada con la de un insecticida comercial. Se estableció un diseño experimental en cultivos de *Brassica oleracea* itálica (brócoli), distribuidos en bloques con cuatro tratamientos: dos concentraciones del bioinsecticida a base de oxalato de calcio, un insecticida comercial y un control con agua. La evaluación se realizó mediante conteos periódicos de la población de insectos presentes en las plantas. Los resultados mostraron una reducción progresiva de *B. brassicae* en los tratamientos con bioinsecticida, siendo la concentración de 0.9 g de oxalato de calcio la más efectiva, con una eficiencia comparable a la del insecticida comercial. En contraste, el tratamiento control no presentó una disminución significativa en la población de la plaga. Los hallazgos demuestran que el oxalato de calcio derivado de residuos de *Z. aethiopica* representa una alternativa viable y sostenible para el manejo de plagas agrícolas. Esta estrategia integra principios de economía circular al otorgar un valor agregado a los residuos generados en procesos de remediación, contribuye a mitigar su impacto ambiental y reduce la dependencia del uso de productos químicos en la agricultura.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de desarrollo sustentable han adquirido una notable relevancia durante la última década, debido a la necesidad urgente de mitigar los impactos ambientales derivados de las actividades antropogénicas. En este contexto, la economía circular se ha consolidado como una estrategia viable para optimizar el uso de los recursos y minimizar la generación de residuos, mediante el aprovechamiento de materiales residuales como insumos en nuevos procesos productivos.

La economía circular constituye un modelo económico orientado a minimizar el desperdicio y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, en contraste con el modelo lineal tradicional, basado en la secuencia “extraer, producir, consumir y desechar”. Este enfoque se fundamenta en principios de sostenibilidad y eficiencia, promoviendo prácticas como la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales (González & Vargas, 2017).

Entre las diversas áreas de aplicación de la economía circular, destaca el tratamiento y reaprovechamiento de residuos vegetales generados en procesos de remediación ambiental. En este sentido, en una investigación previa, se utilizó *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz) en un proceso de electrofitorremediación para el tratamiento de aguas grises. Como resultado de esta investigación, surgió un proyecto alterno basado en principios de economía circular, orientado a la extracción de oxalato de calcio a partir de la biomasa vegetal utilizada durante el proceso de electrofitorremediación, con el propósito de evaluar su potencial como bioinsecticida.

Uno de los principales desafíos asociados a técnicas como la electrofitorremediación radica en la gestión posterior de la biomasa vegetal empleada, ya que esta puede acumular contaminantes y convertirse en un residuo de difícil disposición (Ramírez, 2022). Ante esta problemática, el presente trabajo propone una alternativa basada en el reaprovechamiento de dichos residuos, específicamente de *Z. aethiopica*, previamente utilizada en el tratamiento de aguas grises.

Entre las plagas de importancia agrícola se encuentra *Brevicoryne brassicae* (pulgón de las brasicas, pulgón de la col o pulgón brocolero) el cual representa una de las especies de mayor impacto en cultivos de la familia *Brassicaceae*, debido a su capacidad para alimentarse de la savia vegetal, reducir el crecimiento de las plantas y como vector de enfermedades fitopatológicas. Su rápida reproducción y resistencia progresiva al uso de insecticidas sintéticos han impulsado la búsqueda de alternativas de control más sostenibles y con menor impacto ambiental. En este sentido, la evaluación de bioinsecticidas de origen vegetal constituye una estrategia prometedora para el manejo integrado de esta plaga (Peña et al., 2017).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio consistió en evaluar la eficacia de un bioinsecticida elaborado a partir de oxalato de calcio extraído de *Z. aethiopica* frente a *B. brassicae*, comparando su desempeño con el de un insecticida comercial.

TEORÍA

A nivel internacional, la economía circular ha cobrado impulso como respuesta a desafíos ambientales, como el cambio climático, la escasez de recursos y la contaminación. Organizaciones como la Unión Europea han adoptado estrategias de economía circular, estableciendo políticas para transformar sus economías hacia modelos más sostenibles. La Economía Circular puede contribuir en la sustentabilidad ambiental por medio del rediseño de las organizaciones industriales y la vida doméstica en su conjunto, pues ésta se fundamenta principalmente en la escuela ecologista haciendo una transformación más profunda y duradera, con la finalidad de reducir el impacto provocado por las actividades del ser humano sobre el medio ambiente, ya que se basa en la reutilización inteligente del desperdicio (González & Vargas, 2017).

En el contexto de México, la economía circular ha comenzado a integrarse en las políticas públicas y estrategias de desarrollo. En 2018, el país lanzó su Programa Nacional de Infraestructura Verde, que incluye elementos de economía circular, promoviendo la gestión sostenible de los recursos naturales y la reducción de residuos. Sin embargo, su implementación y aceptación varían significativamente entre sectores (Earth & Life University, 2025).

Algunos de los problemas más importantes que actualmente que enfrenta la protección de los cultivos son consecuencia del uso indiscriminado y casi exclusivo de los insecticidas químicos. El desarrollo de biotipos de insectos resistentes a estos insecticidas y la acumulación de residuos tóxicos en el suelo, en el agua y en los productos cosechados son algunos de los efectos más conocidos y los que provocan una mayor preocupación pública por la repercusión que esto pueda tener en la salud humana y en la calidad del medio ambiente (García & González, 2013).

Por ello, la necesidad de desarrollar otras medidas de control de plagas que permitan el desarrollo de una agricultura sostenible y la conservación del medio ambiente. Una de las alternativas más prometedora y realista es el desarrollo de bioinsecticidas. Estos son compuestos a base de microbios o de metabolitos secundarios de las plantas, con actividad insecticida para el control de insectos que son plagas en cultivos agrícolas de importancia económica (Manzanarez et al., 2025).

Muchas plantas producen cristales de oxalato de calcio como defensa contra animales herbívoros, ya que estos cristales pueden causar irritación en la boca o el tracto digestivo. Su presencia puede ser un indicador del metabolismo saludable en algunas plantas, permitiendo el desarrollo de cultivos más resistentes a plagas sin necesidad de pesticidas químicos (Retana et al., 2019).

El oxalato de calcio es un compuesto químico con la fórmula CaC_2O_4. Es una sal que se encuentra comúnmente en la naturaleza, tanto en forma cristalina como amorfa. Se encuentra generalmente en sus tres formas hidratadas: mono-, di- y trihidrato (Rauní & Pereira, 2017). Este compuesto se forma dentro del citoplasma y se almacena en unas células especializadas llamadas idioblastos Los cristales de oxalato están presentes en casi todas las partes de la planta, como en raíces, hojas, tallos, frutos, semillas, órganos florales, anteras y nódulos radiculares. Estos cristales pueden ser localizados en tejidos específicos como la epidermis, corteza, floema, xilema y médula.

La síntesis y acumulación de CaC_2O_4 es común entre algunas plantas y está relacionada con procesos de biomineralización, pueden presentarse en forma de rafidios (cristales con forma de aguja), drusas (agregados esféricos de cristales), estiloides (cristales alargados con extremos puntiagudos o ásperos), prismas o rombos (aislados o en grupos) y arena cristalina. Su función parece ser la eliminación del exceso de calcio y la regulación de la acidez en la célula vegetal. Sin embargo, también contribuye a la manera en que la planta absorbe la luz solar y constituyen un mecanismo de defensa contra la amenaza que representan los animales (Gallo & Caresana, 2024).

En herbívoros vertebrados se considera un antinutriente que afecta la digestión de algunas proteínas. Asimismo, en ciertas larvas, los cristales de CaC_2O_4 pueden provocar daños a sus mandíbulas (Granados-Sánchez et al., 2006).

A partir de una investigación previa donde se llevó a cabo una electrofitorremediación de aguas grises mediante el uso de *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), se derivó este estudio, donde bajo un esquema de economía circular se realizó la extracción de oxalato de calcio a partir de las plantas usadas en el proceso de electrofitorremediación, con el propósito de usarse como bioinsecticida.

Los insecticidas ecológicos o 'bioinsecticidas' son productos derivados de organismos biológicos, o incluso organismos vivos, que son tóxicos para algunos insectos. Son una opción compatible con el medio ambiente para la protección de cultivos, ya que tienen una letalidad solamente contra ciertos insectos y alcanzan una mayor potencia con dosis más bajas que los insecticidas sintéticos, ayudando así a reducir la contaminación del suelo (Gómez & Pacheco, 2022).

El género *Zantedeschia* es usada ampliamente en la industria ornamental, destacando como flor de corte, en maceta y como elemento decorativo en jardines. Así mismo, se ha evaluado su uso como especie emergente para la remoción de arsénico (As) en agua a bajas concentraciones para consumo humano en humedales subsuperficiales de flujo horizontal (HASSFH) con alimentación en batch, incrementando la retención de As alrededor de un 20% (Rivas, 2014).

Del mismo modo, *Z. aethiopica*, tiene potencial para usarse en el control de insectos minadores, chupadores, barrenadores y masticadores al presentar acción repelente por la presencia de oxalato de calcio, este actúa por ingestión, causando trastornos digestivos, por lo que el insecto deja de alimentarse (Gallo & Caresana, 2024).

Para para esta investigación se evaluó *Brassica oleracea* var. Itálica, conocida comúnmente como brócoli, es una hortaliza de la familia Brassicaceae correspondiente al género Brassica. El brócoli es un cultivo de gran importancia mundial debido a su alto valor nutricional y demanda en el mercado fresco y procesado. Sin embargo, su producción enfrenta importantes desafíos fitosanitarios por plagas clave que amenazan directamente el rendimiento y los estrictos estándares de comercialización (Castro-Valdez et al., 2021).

Los insectos plaga más recurrentes que atacan al cultivo del brócoli son el gusano falso medidor de la col (*Trichoplusia ni* Hubner), gusano importado de la col (*Pieris rapae* L.), gusano telarañero del repollo (*Hellula undalis* F.), el pulgón harinoso de la col (*Brevicoryne brassicae* L.), el pulgón verde del durazno (*Myzus persicae* Sulzer) y la palomilla dorso de diamante (*Plutella xylostella* L.).

El pulgón de las brasicas, pulgón de la col, así como también pulgón brocolero (*Brevicoryne brassicae*), es un insecto hemíptero perteneciente a la familia *Aphididae*. Es una plaga ampliamente distribuida a nivel mundial, principalmente en zonas templadas, y se encuentra asociada a cultivos de la familia *Brassicaceae*, como el brócoli, la coliflor, la col, y otros cultivos relacionados. Este insecto representa una seria amenaza para la producción agrícola debido a su capacidad de reproducción rápida y a los daños directos e indirectos que causa en las plantas hospedadoras (Peña et al., 2017).

En cuanto a su morfología, el pulgón brocolero se caracteriza por tener un cuerpo blando, generalmente de color verde grisáceo o azulado, cubierto de una capa cerosa o polvillo blanquecino.. Los adultos pueden ser ápteros (sin alas) o alados, dependiendo de las condiciones ambientales y de la densidad poblacional. Los ápteros miden entre 1.5 y 2.5 mm de longitud, tienen un cuerpo globoso y antenas relativamente cortas. Los individuos alados son más delgados y presentan alas transparentes que facilitan la dispersión hacia nuevas plantas (González et al., 2015).

El ciclo de vida del pulgón brocolero dura entre 16 – 50 días. A medida que la temperatura aumenta la duración del ciclo de vida disminuye notablemente. La reproducción de *B. brassicae* ocurre principalmente por partenogénesis telítoca durante la mayor parte del año, es decir, las hembras dan lugar a crías vivas sin necesidad de fecundación (Hermoso et al., 2010).

Esto les permite incrementar rápidamente su población bajo condiciones favorables. En regiones de clima templado o frío, el pulgón puede presentar una fase sexual en otoño, durante la cual machos y hembras se reproducen para producir huevos de resistencia que sobreviven al invierno. Posteriormente, en primavera, estos huevos eclosionan y reinicia el ciclo de reproducción partenogenética (Navarro & García, 2014).

El daño causado por el pulgón brocolero es tanto directo como indirecto. De manera directa, los insectos succionan la savia de los tejidos jóvenes, debilitando a la planta, retrasando su crecimiento y afectando la calidad del producto final. Indirectamente, los pulgones excretan una sustancia azucarada conocida como mielecilla, que favorece el desarrollo de hongos como la fumagina (*Capnodium* spp), los cuales reducen la fotosíntesis y deterioran aún más el aspecto y la calidad comercial del cultivo. Además de ser vector de diversos virus fitopatógenos, como el virus del mosaico de la col (Cauliflower Mosaic Virus), que puede causar pérdidas significativas (Navarro & García, 2014).

PARTE EXPERIMENTAL

Para el trabajo experimental, se estableció un modelo experimental en bloques al azar con parcelas divididas, se establecieron las condiciones óptimas del suelo para el crecimiento de brócoli (humedad 20-60%, riegos ligeros y frecuentes, pH de 5.5 a 7, 6 a 8 horas de luz directa al día). Se realizó el trasplante de las plántulas de brócoli, considerando un espacio de 40 a 50 cm de separación entre cada planta y organizando las plantas en 3 grupos de 16 plantas.

Para la extracción de oxalato de calcio a partir de *Z. aethiopica*, se recolectaron 300 g de biomasa vegetal, la cual fue sometida a un proceso de lavado con agua destilada para eliminar contaminantes superficiales. Posteriormente, las muestras se trituraron hasta obtener una pasta homogénea, que fue mezclada con 500 mL de agua destilada y agitada durante 30 minutos a temperatura ambiente. La mezcla resultante fue filtrada para separar los sólidos y el extracto líquido se concentró hasta un volumen aproximado de 300 mL mediante calentamiento en baño maría a 50 °C.

Una vez concentrada, se ajustó el pH a un rango de 4–5 utilizando ácido acético glacial y se añadió gradualmente ácido nítrico bajo agitación constante para favorecer la precipitación del compuesto, La solución resultante se colocó en recipientes estériles de plástico y se dejó reposar durante 24 horas a temperatura ambiente dentro de una campana de extracción, permitiendo la formación de cristales de oxalato de calcio.

Se evaluaron cuatro tratamientos; T1, bioinsecticida con 0.3 g de oxalato de calcio; T2, bioinsecticida con 0.9 g de oxalato de calcio; T3, insecticida comercial a base de flupiradifurone (1 mL/L); y TC, agua como control. La infestación de *Brevicoryne brassicae* ocurrió de forma natural. Una vez colonizadas las plantas, se realizó un conteo inicial de insectos.

Posteriormente, cada tratamiento se aplicó por aspersión uniforme sobre el follaje, asegurando que se cubriera toda la planta con los tratamientos. Cada tres días se efectuaron nuevos conteos, repitiendo el procedimiento durante seis evaluaciones consecutivas, para sumar un total de 18 días de tratamiento. Para rociar las plantas se hizo uso de una barrera en forma de aro, para asegurar que las plantas que se encontraban alrededor no tuvieran contacto más que con el tratamiento que le correspondía a cada una (Figura 1).



Figura 1. Barrera de protección elaborada por los autores.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los conteos promedio de los insectos durante los dieciocho días del experimento. Los datos, indican que el T3 (insecticida comercial) mostró la mayor reducción progresiva en el número de insectos, terminando con el promedio más bajo al día 18 (11.2 insectos), mientras que el T2 (0.9 gr de oxalato de calcio) presentó un comportamiento intermedio con reducción constante en el número de insectos, por su parte el T1 (0.3 gr de oxalato de calcio) también disminuyó la población, aunque con menor eficacia relativa. En contraste, el TC (agua/control) mantuvo poblaciones elevadas de insectos e incluso incrementos en algunas fechas de muestreo, evidenciando la ausencia de efecto insecticida.

Tratamiento	Antes de la aplicación (día 0)	1ª aplicación (día 3)	2ª aplicación (día 6)	3ª aplicación (día 9)	4ª aplicación (día 12)	5ª aplicación (día 15)	6ª aplicación (día 18)
T1	72.2^{a}	115.5^{a}	94.5^{a}	71.7^{a}	52.7^{a}	39.2 ^{a}	26.7 ^{a}
T2	69.7^{a}	73.0^{a}	61.7^{a}	51.2^{a}	40.2^{a}	29.7 ^{a}	20.0 ^{a}
T3	84.0^{a}	109.2^{a}	85.0^{a}	60.0^{a}	39.0^{a}	24.0 ^{a}	11.2 ^{a}
TC	66.2^{a}	70.2^{a}	74.2^{a}	77.7^{a}	82.0^{a}	85.7^{b}	89.7^{b}

Tabla 1. Conteo promedio de insectos por tratamiento durante el periodo experimental. Tratamientos con letras distintas indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2, se muestra la variación poblacional del insecto plaga en términos del tiempo con respecto a los tratamientos aplicados, siendo evidente que el T2 presenta una tendencia similar al del insecticida comercial.

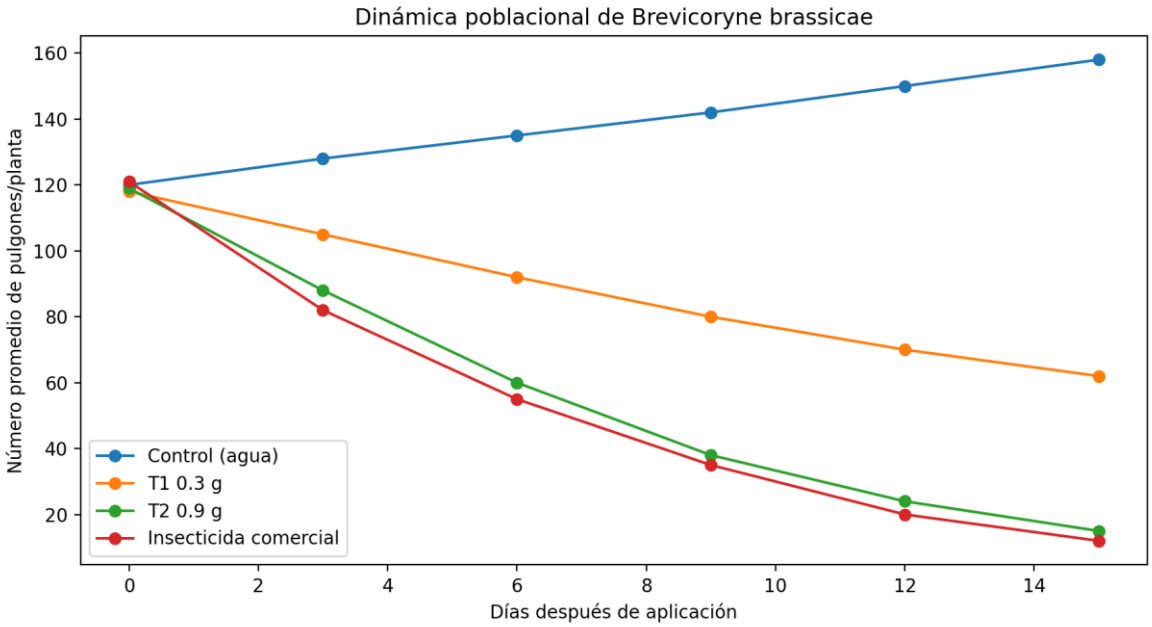


Figura 2. Variación poblacional de *B. brassicae* en función del tratamiento aplicado.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, se muestra la reducción poblacional en términos porcentuales para el T1, T2 y T3, lo que confirma que tanto el insecticida comercial como el oxalato de calcio, especialmente en su concentración de 0.9 g (T2), fueron efectivos en la reducción de la plaga. Visualmente, las plantas tratadas con T2 y con el producto comercial presentaron menor daño foliar, mejor vigor y menor acumulación de colonias en hojas tiernas.

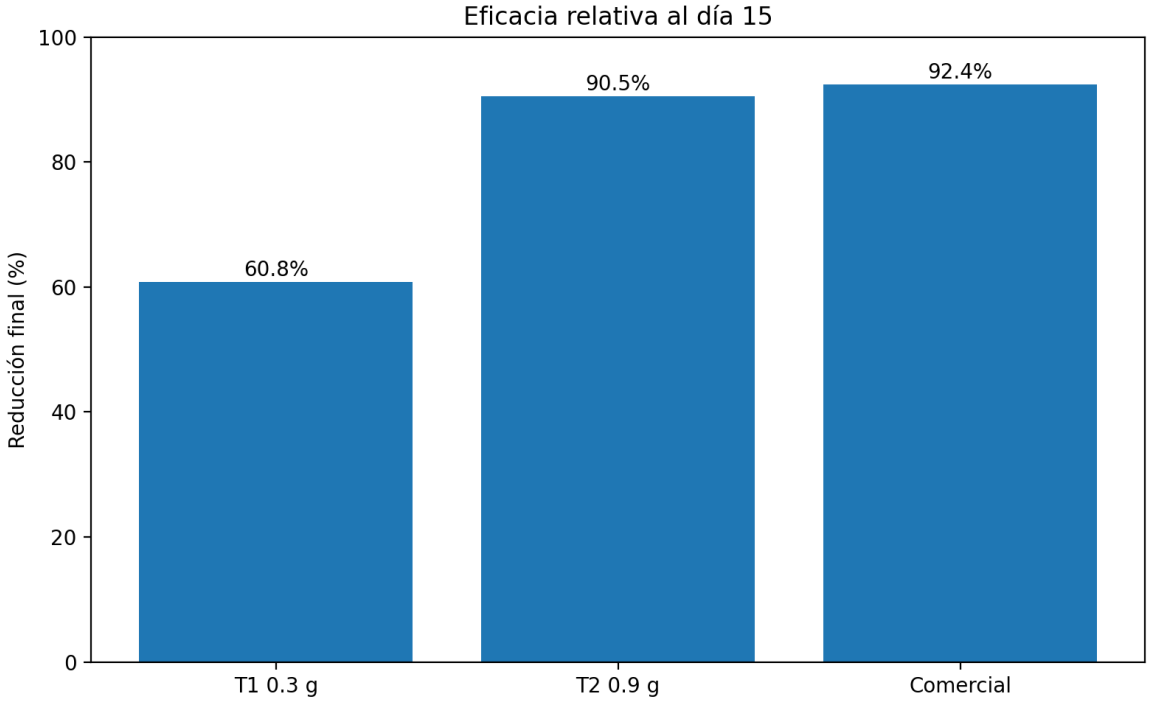


Figura 3. Reducción porcentual final de la plaga al término del ensayo.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que el oxalato de calcio extraído de *Zantedeschia aethiopica* puede representar una alternativa viable para el control de *Brevicoryne brassicae* en cultivos de *Brassica oleracea* itálica, evidenciando una reducción progresiva en la población de insectos tratados con el bioinsecticida. Los resultados obtenidos mostraron que una de las concentraciones evaluadas alcanzó una efectividad comparable a la de un insecticida comercial, mientras que el tratamiento control no presentó disminuciones significativas de la plaga. Asimismo, la investigación permitió evidenciar el potencial de la economía circular aplicada a procesos de remediación ambiental, al proponer el reaprovechamiento de residuos vegetales generados durante la electrofitorremediación para el desarrollo de productos con valor agregado. De esta manera, se contribuye tanto al manejo sostenible de residuos como a la disminución del uso de agroquímicos convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. González, I., & Vargas, J. (2017). La economía circular como factor de la responsabilidad social. *Revista de Coyuntura y Perspectiva, 2*(3). http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2415-06222017000300004
2. Ramírez, C. (2022). *Electrofitorremediación de suelo contaminado con cobre mediante el uso de Spinacia oleracea* [Tesis de licenciatura, TecNM/IT del Valle de Morelia]. https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/5065/1/RAMIREZ%20RAMIREZ%20CARLOS%20AUGUSTO.pdf
3. Peña, R., Muñoz, A., Marín, A., Bujanos, R., Tamayo, F., Luévano, J., Sánchez, L., & Ibarra, J. (2017). *Guía ilustrada para la identificación de los pulgones (Hemiptera:Aphididae) de cereales en México*. https://doi.org/10.13140/rg.2.2.35978.98241
4. Earth & Life University. (2025). *Economía Circular en Acción Casos y Estrategias desde México* (1.a ed.). https://doi.org/10.71212/eauleec06250002
5. García, C., & González, M. (2013). Síntesis sobre el uso de bioinsecticidas y otros agentes de control biológico de plagas en México. *Vedalia, 14*(1), 35-42. https://www.researchgate.net/publication/259944646_Sintesis_sobre_el_uso_de_bioinsecticidas_y_otros_agentes_de_control_biologico_de_plagas_en_Mexico
6. Manzanarez, L., García, C., & Flores, G. (2025). Bioinsecticidas para el control de plagas agrícolas. *EPISTEMUS, 19*(38), e3810356. https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.356
7. Retana, K., Castro, O., & Blanco, M. (2019). Determinación de la presencia de cristales de oxalato de calcio asociados a la enfermedad abiótica conocida como “Mancha Blanca” en Hylocereus costaricensis. *Agronomía Costarricense, 43*(2). https://doi.org/10.15517/rac.v43i2.37950
8. Rauní, R., & Pereira, L. (2017). Ocorrência de oxalato de cálcio em diferentes espécies vegetais de uso ornamental. *Revista de Ciências Ambientais, 11*(3), 41. https://doi.org/10.18316/rca.v11i3.3571
9. Gallo, I., & Caresana, A. (2024). Poisoning due to ornamental plants belonging to the Araceae family: Review of botanical and toxicological aspects relevant for clinical practice. *The Poison., 1*(2), 50-56. https://doi.org/10.62129/nvkd2964
10. Granados-Sánchez, D., Ruíz-Puga, P., & Barrera-Escorcia, H. (2006). Ecología de la herbivoria. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 14*(1). https://classic.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182008000100009
11. Gómez, I., & Pacheco, S. (2022). La bacteria Bacillus thuringiensis como bioinsecticida en la agricultura actual. *Biotecnología en movimiento, 29*. https://biotecmov.ibt.unam.mx/services/pdfDownloader.php?id=MjkqKl8qKjI=
12. Rivas, A. (2014). *Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua: Memorias de la Segunda Conferencia Panamericana en Sistemas de Humedales para el Manejo, Tratamiento y Mejoramiento de la Calidad del Agua. Morelia, Michoacán, México.* (1.a ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2014/11/SistemasDeHumedales.pdf
13. Castro-Valdez, D. F., Pérez-Grajales, M., Pérez-Olvera, M. A., Contreras-Cruz, L. F., & Pineda-Pineda, J. (2021). Residuos de plaguicidas en brócoli (brassica oleracea var. itálica) para el

mercado nacional e internacional. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 37*. https://doi.org/10.20937/rica.53714

14. Peña, R., Muñoz, A., Marín, A., Bujanos, R., Tamayo, F., Luévano, J., Sánchez, L., & Ibarra, J. (2017). *Guía ilustrada para la identificación de los pulgones (Hemiptera:Aphididae) de cereales en México* (1a ed.). https://doi.org/10.13140/rg.2.2.35978.98241
15. González, M., Salas, M., & Martínez, O. (2015). Densidad poblacional del pulgón cenizo de la col Brevicoryne brassicae (L.) (Hemiptera: aphididae) y su relación con la temperatura y su parasitoide Diaeretiella rapae (M´Intosch) (Hemyptera: Aphidiidae), en el cultivo de brócoli en el bajío, México. *Entomología Mexicana, 2*, 423-428. https://www.acaentmex.org/entomologia/revista/2015/EA/PAG%20%20423-428.pdf
16. Hermoso, A., Belliure, B., Llorens, J., Marcos, M., & Michelena, J. (2010). Manejo de pulgones. En *Organismos para el control de patógenos en los cultivos protegidos: Prácticas culturales para una agricultura sostenible* (pp. 289-314). Fundación Cajamar. https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Camacho-Ferre/publication/259621583_Organismos_para_el_control_de_patogenos_en_los_cultivos_protegidos_Practicas_culturales_para_una_agricultura_sostenible/links/5a1d4f3ca6fdcc0af326ca1c/Organismos-para-el-control-de-patogenos-en-los-cultivos-protegidos-Practicas-culturales-para-una-agricultura-sostenible.pdf#page=287
17. Navarro, C., & García, F. (2014). *Guía de identificación: Pulgones y sus enemigos naturales.* Universidad Politécnica de Valencia. https://www.researchgate.net/publication/262262058_Guia_de_identifi_cacion_Pulgones_y_sus_enemigos_naturales

COMPARACIÓN DE DOS RAZAS DE GALLINAS PONEDORAS (RHODE ISLAND VS LEGHORN) EN SISTEMA DE PRODUCIÓN URBANA

Juan Manuel Quezadas Fuentes, José Roberto Vázquez Avendaño, Alfredo Trejo Cordova, Roberto Lazarini Lechuga, Demetrio Alonso Ambriz García

Departamento de Biología de la Reproducción, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa
quezadas_mbra@xanum.uam.mx

RESUMEN

La producción de alimentos en el medio urbano permite a las familias conseguirlos a bajo costo y frescos, en este caso, huevo para plato, con ello, obtienen una importante mejora en la economía y terapia de ocupación. Estos sistemas aprovechan de manera complementaria los residuos orgánicos de la cocina y de la jardinería mejorando así el ambiente. Un programa intenso de avicultura urbana, denominado “mujeres con huevos”, se impulsó en la alcaldía de Iztapalapa de la Ciudad de México desde el año 2020, se colocaron más de 50,000 gallinas de raza Leghorn, distribuidas en pequeñas parvadas de 10 gallinas para cada beneficiario. El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de comparar el comportamiento productivo de esta raza durante los primeros 6 meses de postura con otra raza comercial semi pesada (Rhode Island). Se compararon dos pequeñas parvadas de gallinas de 4 gallinas de Leghorn (L) y 4 Rhode Island (RI). Las pollas se adquirieron vacunadas a las 3 semanas de vida. Se registró el consumo de alimento, y en los siguientes 6 meses de inicio de postura (junio a diciembre de 2025), se registró la frecuencia y el costo de producción del huevo. El costo de alimentación (crecimiento y desarrollo, Api-Aba®) desde pollas hasta postura (20 semanas) fue de $1,195.00 por ambas parvadas ($170.71 por ave). Ya adultas, el consumo diario de alimento (pone Oro, Api-Aba®) fue de 100.3±13.2g y 112±7.9g para L y RI ($p<0.05$). El peso del huevo fue de 55.6±6.6g y 56.3± 1.9g, respectivamente ($p>0.05$). El costo de producción por huevo fue de $1.3 y $1.47, respectivamente ($p>0.05$). La eficiencia mensual de postura fue de 75.7% y 76.32% respectivamente. Se concluye que la Raza L resultó ser ligeramente superior, con adaptabilidad y buen desempeño en el entorno urbano, aunque de comportamiento más nervioso, y que la raza RI presentó comportamiento más apacible y mostró mejor consumo de residuos de cocina y jardinería. Ambas razas son recomendables para la producción urbana de huevo.

INTRODUCCIÓN

La agricultura familiar, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), es el un modelo predominante en el mundo para la producción de alimentos, misma que enfrenta retos tecnológicos y ambientales para subsistir y hacer frente a la demanda por el aumento de la población (FAO, 2014).

La cría de gallinas ponedoras en entornos urbanos, para la producción de huevo destinado al autoconsumo, representa un aporte a la seguridad alimentaria de las familias y comunidades, por su bajo costo de mantenimiento, fácil adquisición, bajo costo de producción y por la facilidad de obtener alimentos frescos (huevo para plato y ocasionalmente carne), con ello, la economía familiar mejora, además, esta actividad puede servir como terapia de ocupación. Estos sistemas aprovechan de manera complementaria los residuos orgánicos de la cocina y de la jardinería, transformando así algunos desechos en fuente de alimento, lo cual supone una mejora para el ambiente. (Hernández *et al*., 2022).

Estos sistemas se caracterizan por la diversidad de especies ya que suelen criarse en conjunto con, guajolotes, patos y hasta cerdos. Siendo las encargadas del hogar las personas que en su mayoría realizan las actividades de cuidado, mantenimiento y cosecha, en su mayoría, las familias destinan los productos al autoconsumo (Pérez-Ramírez *et al.,* 2023). Una característica de estos sistemas

de crianza es la dieta diversificada que integra alimento comercial, y se apoya de alimento fresco, proveniente de quelites arvenses. Dentro de los más comunes están el Amaranto (*Amarantus sp*.), Chepil (*Crotalaria longirostrada*), Epazote (*Dysphania ambrosioides*), Hierba mora (*Solanum americanum*), Hierba santa (*Piper autitum*), y Verdolaga (*Portuca olerecea*) algunas de estas especies son de interés por sus propiedades nutraceúticas (Camacho-Escobar *et al*., 2023).

Existen algunos factores que limitan la propagación de estos sistemas de producción, estereotipándolos, algunos por ejemplo el crecimiento urbano y las estrategias educativas que se basan en modelos hegemónicos y globales que influyen en la poca valorización que tienen las aves en núcleos urbanos (Ortega y Casas., 2022).

Algunas políticas públicas se han enfocado en impulsar la agricultura y ganadería urbana para mejorar la calidad de vida de familias con rezago social, tal es el caso del programa “Mujeres con huevos” que implementó la alcaldía de Iztapalapa de la Ciudad de México desde el año 2020, en el cual se colocaron más de 50,000 gallinas de raza Leghorn, distribuidas en parvadas de 10 gallinas otorgadas a cada beneficiario.

El huevo de gallina domestica (Gallus *gallus domesticus*) es un producto de alto valor nutricional por su alto valor proteico. México es el principal consumidor de huevo en Latinoamérica, en 2024 el consumo *per capita* fue de 24 kg, lo que se traduce en 392 piezas por año (Panorama agroalimentario 2025). Además de las grandes empresas productoras, la avicultura de traspatio, mantenida en zonas de escasos recursos y entornos urbanos representa una actividad importante para la seguridad alimentaria de estas comunidades (Cruz-Sánchez *et al*., 2016).

En el país, la demanda de huevo no solo está determinada por los precios y la competencia entre productores, sino que en ella influyen los precios a los que se enfrenta el consumidor final, situaciones zoosanitarias que merman la producción, en conjunto con la demanda de otras fuentes de proteína como la carne de cerdo, res, pollo y el poder adquisitivo (Rivera-Gómez *et al.,* 2023).
El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de comparar el comportamiento productivo de la raza Leghorn durante los primeros 6 meses de postura con otra raza comercial semi pesada (Rhode Island) en condiciones de producción urbana.

MATERIALES Y METODOS

Con el objetivo de conocer el comportamiento productivo de las gallinas colocadas por la alcaldía Iztapalapa dentro del programa “Mujeres con Huevos” se comparó la postura de estos animales contra la de otra raza comercial, durante los primeros seis meses de producción. Se establecieron dos parvadas pequeñas, la primera constituida por 4 gallinas de raza Leghorn (L)(Ver fig.1) y la segunda por 4 gallinas Rhode Island (RI)(ver fig. 2), para evitar inconformidades con los vecinos por el ruido se decidió prescindir, la presencia de gallos en ambos grupos. Los ejemplares se adquirieron a las 3 semanas de vida, ya vacunadas. Se alojaron en corrales separados ubicados en la azotea de un hogar ubicado en la alcaldía Iztapalapa, con sombra, con acceso libre a agua y alimento. Desde su llegada se registró el consumo de alimento hasta los 6 meses tiempo que tardaron en iniciar la postura (junio a diciembre de 2025), periodo en el cual se utilizó alimento comercial Api-Aba® de las etapas de crecimiento y desarrollo, se estimó el costo de alimentación por individuo, además se complementó la dieta con residuos vegetales provenientes de la cocina (cáscaras de jitomate, cebolla, pepino, restos de apio entre otros) y de jardinería (hojas y tallos de hortalizas cultivadas en un huerto cercano). Una vez llegada la etapa adulta se utilizó alimento comercial “pone Oro” marca Api-Aba®. También, se registró la frecuencia de postura y se estimó el costo por unidad de producción de huevo. Además, se evaluó la eficiencia mensual de postura, calculada para cada parvada con la siguiente formula:

Eficiencia mensual= (total de huevos producidos por mes/Total de aves iniciales por mes x Días del mes) x 100.
Los resultados fueron comparados estadísticamente a través de la prueba t-Student con significancia de $p<0.05$.



Fig 1. Parvada de gallinas raza Rhode Island, dentro de su corral, aprovechando residuos de cocina para su alimentación.



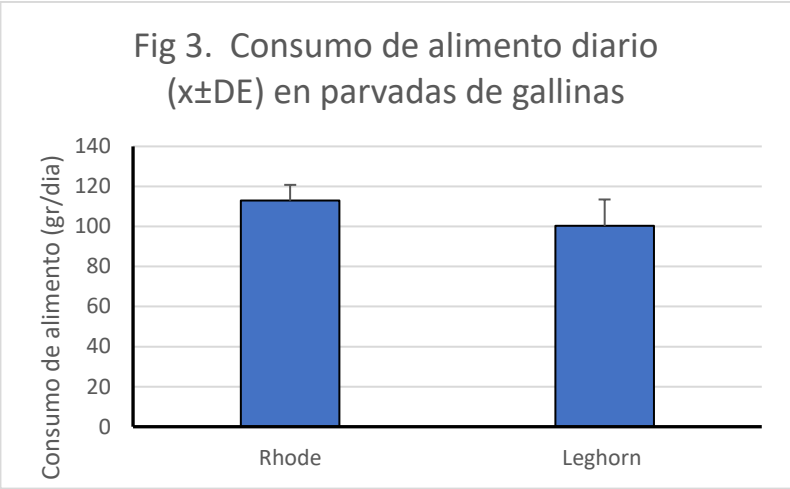
Fig 2. Parvada de gallinas raza Leghorn, dentro de su corral, al fondo se aprecian ejemplares de la raza Rhode Island.

RESULTADOS

Existen numerosas razas y variedades de gallinas, es la especie animal de producción con mayor diversidad genética, dada algunas características como lo es la corta edad a madurez sexual, la facilidad de inseminación y la incubación artificiales, por ello existe una amplia posibilidad de elegir razas artificialmente mejoradas, a la par de razas o variedades de gallinas criollas.

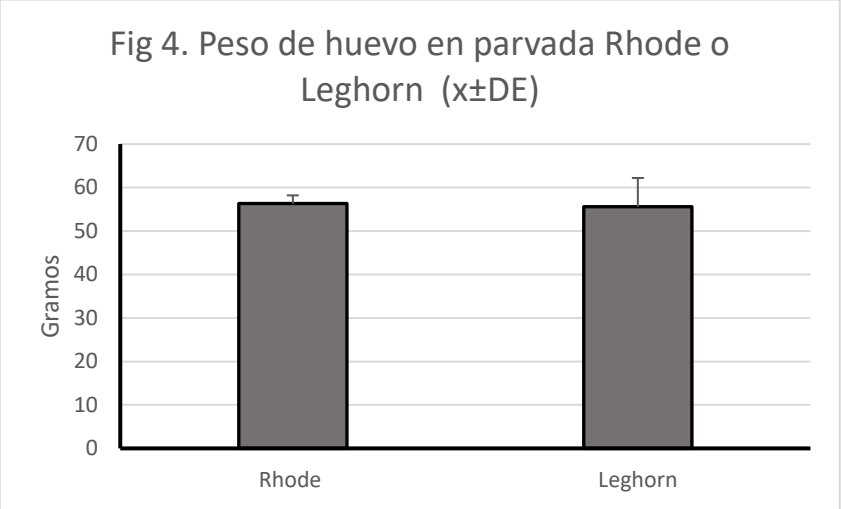
La elección de la gallina Leghorn en un programa de abasto masivo en la alcaldía Iztapalapa, desde luego que contó con la decisión y supervisión de personal especializado que llevaron a elegir esta raza como conveniente a pesar de lo disímbolo de las condiciones en que serían criadas y mantenidas, y que, a pesar de sus altos requerimientos nutricionales, consideraran que una dieta variada podría ser la realidad de las personas usuarias del programa de fomento. Por otro lado, la rusticidad como elemento clave de otras razas y variedades de gallinas, como en este caso la Rhode Island, podría jugar un papel de relevancia, comenzando por el color “rojo” (café ocre) de su plumaje y la resistencia a factores climáticos y ambientales, por lo que su crianza podría ser ventajosa en estos sistemas de producción urbana.

El costo de alimentación desde pollas hasta adultos (5 meses o 20 semanas) en que comienza la ovoposición (“postura”) del huevo, es un dato de relevancia, dado que las pollas representaran un costo de inversión antes de que comience la producción, en este caso fue de $1,195.00 para ambas parvadas ($170.71 cada ejemplar), sin encontrar diferencias entre parvada. Posteriormente, ya en etapa adulta y productiva, el consumo diario de alimento fue de 100.3±13.2g y 112±7.9 g para L y RI (Ver fig. 3), en los que se encontraron diferencias estadísticamente significativas con una $p<0.05$. Lo cual obedece en principio a la mayor talla de la raza RI.



P=0.045

El peso promedio del huevo fue de 55.6±6.6 g para la parvada L y de 56.3± 1.9 g para RI, sin que se encontraran diferencias entre grupos (p>0.05)(ver fig. 4).



P=0-27

El costo de producción calculado por unidad (huevo) fue similar entre ambas parvadas, este valor desde luego que varía según el número de huevos puestos por la parvada en el día, pero se obtienen valores promedios mensuales y se calcula por el total de alimento consumido mensual, siendo de $1.3 para L y de $1.47 para RI, sin que se encontraran diferencias significativas(p>0.05). Finalmente, la eficiencia mensual de postura calculado con la fórmula detallada inicialmente, donde se considera el número de aves, por el número de días calculados, fue de 75.7% y 76.32% respectivamente, lo que pone de manifiesto una eficiencia adecuada, considerando las particularidades del sistema urbano para ambas razas.

DISCUSIÓN

El comportamiento productivo de ambas parvadas fue similar en los aspectos evaluados, en particular a los parámetros de consumo de alimento y costos de producción de huevo, siendo solo diferentes en el costo de alimentación en las etapas adulta y productiva, es decir, la parvada L necesito de menor consumo de alimento durante la postura, respecto de RI, con ello se hace evidente que ambas razas son adecuadas para establecer sistemas de producción de autoconsumo, en los que además se pueden obtener productos a precios competitivos, con el potencial de ser

comercializados. Al respecto existen algunos trabajos que evalúan la factibilidad de estos sistemas, para generar ingresos económicos. Viglíocco *et al.,* (2025) reportaron factible el mantener estos sistemas de pequeña escala para distribuir los productos en circuitos cortos (comercialización local) generando beneficios económicos y promoviendo organización social. Desde luego, el sistema de producción también influye en el producto final, según Romo *et al.,* (2022) la calidad de los huevos producidos en corrales al aire libre es menor, al estar más sucios comparados con los producidos en parvadas en jaula, en sistema semi-tecnificado.

La valoración económica de la producción de traspatio enfrenta algunas limitantes para la su rentabilidad, Mateo_Rocha *et al.,* (2023) argumentan que la competitividad en algunos sistemas de traspatio de Veracruz es difícil de evaluar debido a que sus costos de producción no están debidamente calculados, y que no representan el principal sustento familiar. Además, Mata-Estrada *et al*., (2023) resaltan la importancia de optimizar estos sistemas de producción con recursos zoogenéticos y vegetales locales, a fin de aprovechar al máximo el potencial productivo de los ejemplares por su rusticidad y adaptabilidad al entorno. También, en la producción de traspatio deben implementarse medidas de sanidad y planes de vacunación, para evitar que sean sitios de propagación de enfermedades, afecciones como coriza infecciosa originada por *Avibacterium paragallinarum* o la *gallibacteriosis* ya que estas afectan principalmente a gallinas de postura y pollos de engorda, reduciendo entre el 10 y el 40% la producción de huevo (Matías-Vera *et al*., 2024). Una opción importante es la de utilizar razas y variedades adaptadas a las condiciones locales, al poseer resistencia natural a ciertas enfermedades y hacer mejor aprovechamiento de los recursos forrajeros de la zona, en torno a ello algunos autores han reportado las características morfométricas y parámetros productivos de gallinas criollas para tenerlas como una alternativa viable (Illescas-Cobos *et al*., 2022; Vázquez-Mendoza *et al.,* 2025). Por último, Osio-Orihuela et al., (2022) reportaron que el crecimiento de las razas criollas mexicanas, Rhode Island Red y Hy-Line Brown tiene un comportamiento de crecimiento similar desde los 7 hasta los 210 días, y con base en ello proponen que estas razas se pueden emplear en modelos de crianza similares.

CONCLUSIONES

Al final del trabajo la raza Leghorn resultó ser ligeramente superior en las etapas de crecimiento y desarrollo al requerir menos alimento para llegar a la etapa de postura. Ambas parvadas se adaptaron y mostraron buen desempeño en el entorno urbano, si bien Leghorn presentó comportamiento más nervioso que la raza Rhode Island, ésta última mostró mejor aceptación y consumo de residuos de cocina y jardinería. Ambas razas son recomendables para la producción urbana de huevo, sin descartar que en el futuro se evalúe el potencial de gallinas criollas para este fin. Además, considerar que a través de programas sociales como el de “Mujeres con huevos” es posible generar alimentos saludables para el autoconsumo utilizando alimento comercial, residuos de cocina y jardinería, apoyando así a la satisfacción en la soberanía alimentaria de las familias sin descartar el potencial de comercializar los productos a precios competitivos en redes cortas de comercio. En la actualidad existen pocos trabajos que evalúen el comportamiento productivo de gallinas ponedoras en entornos urbanos, y menos aún en la ciudad de México, que provean de información, acerca de los costos de mantenimiento y producción del sistema y que con ello se facilite la toma de decisiones para mejorar la calidad de vida de los involucrados en aspectos económicos, sociales y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Camacho-Escobar, M. P. Jerez-Salas, S. J. López-Garrido, M. M.Galicia-Jiménez, N. Y. Ávila-Serrano y E. I. Sánchez-Bernal. Quelites usados en alimentación avícola. *Terra Latinoamericana*, *41*, 2023, e1605. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1605
2. Cruz-Sánchez, M. Muñoz-Rodríguez, V. H. Santoyo-Cortés, E. G. Martínez-González, y N. Aguilar-Gallegos. Potencial y restricciones de la avicultura de traspatio sobre la seguridad alimentaria en Guerrero, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, *13*(2), 2016, 257-275.

3. M. Estrada, F.G. Cerón, A.P. Martínez, G.T. Hernández, J. B. Ortega, A.J. V. Galicia y E. S. Montes. Caracterización del sistema de producción avícola de traspatio en el Estado de Campeche, México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 20(2), 2023,125-138.
4. FAO, SOFA. El estado de la agricultura y la alimentación. Roma, 2014. Food and Agriculture Organi-zation of the United Nations. https://www.fao.org/3/i4040e/i4040e.pdf.
5. J. Hernández, O.J. Galicia, E. Melo, R. Valdivia, y L. M. Valenzuela, El huevo de traspatio: ventana de oportunidad de ingresos en comunidades del Municipio de Texcoco, Estado de México. Revista mexicana de ciencias pecuarias, 13(1), 2022. 287-296.
6. A.A. Illescas-Cobos, F. González-Cerón, y A. Pro-Martínez. Caracterización morfométrica y potencial reproductivo de los huevos de gallinas Criollas Mexicanas (Gallus gallus domesticus) dispuestos a incubación artificial. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, *25*, 2022. e509. Epub 23 de junio de 2023.https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.509
7. S.A. Matias, M.P. Sánchez, E. Negrete Abascal y C. Vázquez Cruz. Las aves de granja requieren vacunarse para mantener la producción de alimentos con alto valor nutricional a bajo costo. *RD-ICUAP*, *10*(29), 2024,150–163. https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2024.29.1346
8. R. A. Mateos-Rocha, K. R. Cuevas, V. Méndez, M. A. González-Salas y A. González-Castro. Valoración económica de una granja de traspatio para comercialización de huevo en Tuxpan, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, *11*(2), 2023, 319-329. https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i2.590
9. R. Ortega y A. Casas. “Las aves están en el monte, no en el pueblo”: percepción comunitaria sobre la riqueza aviar asociada a los traspatios de Zacualpan, México. *El hornero*, *37*(2), 2022, 6.
10. L. Osio-Orihuela, D., Zárate-Contreras, F.A. Cigarroa-Vázquez, P. Vazquez-Mendoza y F. González-Cerón. Modelación del crecimiento de aves Criollas Mexicanas, Rhode Island Red y Hy-Line Brown. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *9*(3), 2022, https://doi.org/10.19136/era.a9n3.3287
11. E. Pérez-Ramírez, D. González-Martínez, R. Díaz-Ruiz, J.S. Escobedo-Garrido,J.Contreras-Ramos, R.D. Améndola-Massiotti. Avicultura de traspatio en las familias participantes del programa pesa (FAO) en Cuetzalan del Progreso, Puebla.Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 2024, https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1595
12. S. Rivera-Gómez, R. C. García-Sánchez, R. García-Mata y I. Caamal-Cauich, Ignacio. Análisis del mercado de huevo en México, 1975-2020. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, *33*(61), 2023, e231306. https://doi.org/10.24836/es.v33i61.1306
13. S. Romo, D. López, N. Ledesma, C. Gutiérrez, A. Quintana y L. Rangel, Lucía. Comparación en la calidad de huevos obtenidos en un sistema de producción en corrales al aire libre y los producidos en un sistema de jaula. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, *13*(1), 2022, 32-42. https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i1.5300
14. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. *Panorama Agroalimentario 2025*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2025. Ciudad de México, México. https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/2025.pdf
15. P. Vázquez-Mendoza, G. I. Henández-Melchor, J. Hernández-Morales, M. B. Bottini-Luzardo y L. A. Saavedra-Jiménez. Caracterización zoométrica de gallinas de traspatio de comunidades indígenas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *12*(2), 2025 e4046. https://doi.org/10.19136/era.a12n2.4046
16. M. J. Vigliocco, J. A. Salminis, M. L. Peralta y M.N. Ricci. Estudio de factibilidad económica para el abastecimiento de huevos de gallina en sistemas productivos de pequeña escala en el Gran Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Ab Intus, 8(16), 2025. https://doi.org/10.63207/ai.v8i16.178

ESTUDIO COMPARATIVO DE NANOCELULOSA DERIVADA DE RESIDUOS DE PIÑA (*Ananas Comosus*) Y MANGO (*Mangifera Indica)*

Danna Yaretzi Cruz Cervantes, Jazmin Montiel Cruz, Estrella Monserrat Villar Solis, Braulio Carreto Lopez, Ingrid Sarai Monterrubio Finkenthal, Jorge Alberto Granados Olvera, Alondra Nereida Abonce Mendez

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez
alberto.granados@utfv.edu.mx

RESUMEN

La nanocelulosa representa un biomaterial de gran interés por sus propiedades estructurales y su potencial en aplicaciones sustentables. En este estudio se compararon las características de la nanocelulosa obtenida a partir de residuos agroindustriales de piña (*Ananas comosus*) y mango (*Mangifera indica*), empleando un pretratamiento alcalino con NaOH seguido de hidrólisis ácida con H_2SO_4. Las nanofibras aisladas fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TGA) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los análisis de DRX confirmaron la presencia de la fase Celulosa I en ambas muestras, con grados de cristalinidad en el rango de 32–35% y tamaños promedio de cristalitas nanométricos. Los resultados de TGA evidenciaron que la nanocelulosa derivada de piña presenta mayor estabilidad térmica y una degradación más controlada, mientras que la obtenida de mango mostró un comportamiento de descomposición más abrupto. Las micrografías SEM revelaron diferencias morfológicas significativas: la nanocelulosa de mango exhibió fibrilas rugosas y heterogéneas con tendencia a la fragmentación, en contraste con la red fibrilar compacta y homogénea observada en la nanocelulosa de piña, asociada a mayor cristalinidad y resistencia térmica.En conjunto, los hallazgos sugieren aplicaciones diferenciadas: la nanocelulosa de piña se perfila como un material idóneo para entornos de alta temperatura y usos estructurales, mientras que la de mango puede aprovecharse en materiales compuestos o biodegradables, donde la interacción superficial y la degradabilidad constituyen ventajas. Este trabajo confirma la viabilidad de los residuos agroindustriales como fuente sustentable de biomateriales, aportando soluciones innovadoras para la reducción de residuos agroindustriales y el desarrollo de tecnologías verdes.

INTRODUCCIÓN

La creciente acumulación de residuos agroindustriales provenientes de frutas tropicales como la piña (*Ananas comosus*) y el mango (*Mangifera indica*) representa un reto ambiental y, al mismo tiempo, una oportunidad estratégica para la obtención de materiales avanzados. Estos residuos, tradicionalmente destinados a compostaje o disposición en vertederos, contienen una fracción significativa de celulosa, la cual puede ser transformada en nanocelulosa mediante procesos químicos, enzimáticos y mecánicos.

La nanocelulosa se ha consolidado como un material de interés en la última década debido a su alta cristalinidad, resistencia mecánica, biodegradabilidad y versatilidad funcional. Su producción a partir de residuos agrícolas se alinea con los principios de la economía circular, al convertir desechos en insumos de alto valor agregado. En este contexto, la comparación entre nanocelulosa derivada de piña y mango resulta relevante, ya que cada fuente vegetal aporta características estructurales y fisicoquímicas diferenciadas.

Estudios recientes han demostrado que la nanocelulosa obtenida de residuos de piña presenta mayor estabilidad térmica y cristalinidad, lo que la hace adecuada para aplicaciones en biocomposites estructurales y materiales resistentes al calor (Granados-Olvera et al., 2025). Por otro lado, la nanocelulosa derivada de residuos de mango exhibe rugosidad superficial y fragmentación

más marcada, favoreciendo su interacción con matrices poliméricas y su uso en empaques biodegradables y materiales de rápida descomposición (Hernández Pérez et al., 2023).

La literatura reciente también enfatiza la importancia de optimizar los procesos de extracción, ya que la eficiencia energética y el costo de producción siguen siendo desafíos para la escalabilidad industrial (Vargas Mesén et al., 2023). En consecuencia, los estudios comparativos entre diferentes fuentes de residuos no solo aportan conocimiento sobre las propiedades físico-químicas de la nanocelulosa, sino que también orientan su aplicación en sectores como la biomedicina, la ingeniería de materiales y la remediación ambiental.

En suma, el análisis comparativo de nanocelulosa derivada de piña y mango contribuye a fortalecer la investigación en nanomateriales verdes, promoviendo alternativas sostenibles que responden a los retos actuales de contaminación y aprovechamiento de residuos agroindustriales.

TEORÍA

La nanocelulosa es un material derivado de la celulosa que se obtiene mediante la reducción de fibras vegetales a escala nanométrica, lo que le confiere propiedades únicas como alta cristalinidad, resistencia mecánica, biodegradabilidad y gran área superficial. La celulosa, principal componente estructural de las paredes vegetales, está formada por cadenas lineales de glucosa unidas por enlaces β-(1→4), organizadas en microfibrillas con regiones cristalinas y amorfas. A través de procesos de hidrólisis ácida, pretratamientos alcalinos y métodos mecánicos como homogeneización o ultrasonido, es posible aislar nanocristales de celulosa (CNCs) y nanofibras de celulosa (CNFs), cada uno con características específicas (Hernández Pérez et al., 2023).

En el contexto de la economía circular, la obtención de nanocelulosa a partir de residuos agroindustriales representa una alternativa sostenible para valorizar desechos que, de otro modo, serían destinados a compostaje o vertederos. Entre estos residuos destacan los de piña (*Ananas comosus*)** y mango (*Mangifera indica*), frutas tropicales ampliamente cultivadas en América Latina y Asia. La composición química y morfológica de sus fibras influye directamente en las propiedades finales de la nanocelulosa obtenida.

Estudios recientes han demostrado que la nanocelulosa derivada de residuos de piña presenta mayor cristalinidad y estabilidad térmica, lo que la hace adecuada para aplicaciones en biocomposites estructurales y materiales resistentes al calor (Granados-Olvera et al., 2025). En contraste, la nanocelulosa obtenida de residuos de mango exhibe rugosidad superficial y fragmentación más marcada, favoreciendo su interacción con matrices poliméricas y su uso en empaques biodegradables y materiales de rápida descomposición (Vargas Mesén et al., 2023).

La literatura enfatiza que, aunque la nanocelulosa posee un enorme potencial en áreas como biomedicina, empaques sostenibles, refuerzo de polímeros y remediación ambiental, aún persisten retos relacionados con la eficiencia energética y los costos de producción. Por ello, los estudios comparativos entre diferentes fuentes vegetales no solo aportan conocimiento sobre las propiedades físico-químicas de la nanocelulosa, sino que también orientan su aplicación en sectores específicos, fortaleciendo la investigación en nanomateriales verdes y promoviendo alternativas tecnológicas alineadas con los objetivos de sostenibilidad global (Hernández Pérez et al., 2023; Vargas Mesén et al., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

SÍNTESIS

La nanocelulosa fue obtenida a partir de residuos agroindustriales de piña (*Ananas comosus*) y mango (*Mangifera indica*) (Tiwari y Sanjog, 2025). Las muestras, compuestas por cáscaras y fibras residuales, fueron recolectadas, lavadas con agua destilada, trituradas mecánicamente y secadas

en un horno de convección a 60 °C durante 18 horas. Posteriormente, se sometieron a un pretratamiento alcalino con NaOH al 5% [p/v] con el fin de eliminar impurezas no celulósicas como lignina y hemicelulosa [Figura 1].



Figura 1. Muestra de nanocelulosa en pretratamiento alcalino

La celulosa purificada fue sometida a hidrólisis ácida utilizando H_2SO_4 al 60% [p/p] a 45 °C durante 15, 60 y 90 minutos bajo agitación constante. Este proceso promovió la ruptura de los enlaces glucosídicos, permitiendo la liberación de nanofibras de celulosa [Figura 2]. La suspensión resultante fue neutralizada mediante centrifugación y lavados sucesivos con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro, seguida de un secado final a 60 °C durante 8 horas.

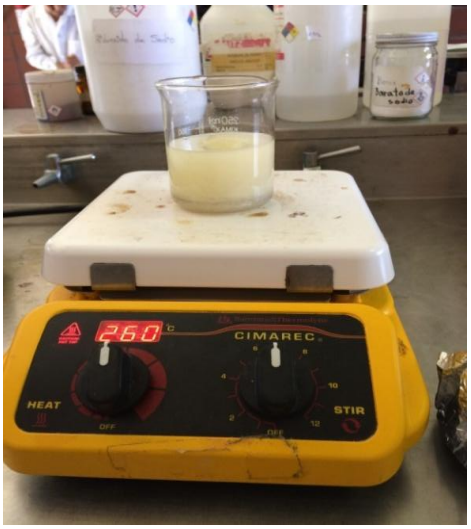


Figura 2. Celulosa en el proceso de hidrolisis ácida

CARACTERIZACIÓN

Difracción de Rayos X (DRX)

La identificación estructural y el análisis de los compuestos resultantes se realizaron mediante difracción de rayos X en polvo (DRX), empleando radiación CuKα_1 con una longitud de onda de 1.5406 Å. El difractograma se registró en modo acoplado [TwoTheta/Theta], lo que permitió una exploración angular precisa dentro del rango de 10° a 90° en 2θ, adecuado para la detección tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos presentes en la muestra.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

La caracterización térmica se llevó a cabo mediante análisis termogravimétrico. La estabilidad térmica de los materiales se midió con un equipo Perkin Elmer Pyris, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, iniciando desde 50 °C y alcanzando hasta 700 °C bajo una atmósfera de nitrógeno.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La morfología superficial de la muestra se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo JEOL JSM-5600. Las imágenes se adquirieron con un voltaje de aceleración de 20 kV y condiciones óptimas para resolver estructuras fibrosas o particuladas sin comprometer la integridad de materiales sensibles.

RESULTADOS

Difracción de Rayos X (DRX)

A partir de los espectros de DRX se obtuvieron los siguientes resultados: El grado de cristalinidad para la muestra de mango es del 35%, mientras que para la muestra de piña es del 32%.
La Figura 3 muestra que la porción cristalina de las muestras obtenidas corresponde a Celulosa I, con base en la comparación con los datos reportados por French (2014), aunque no es posible distinguir claramente si se trata de la forma α o β.

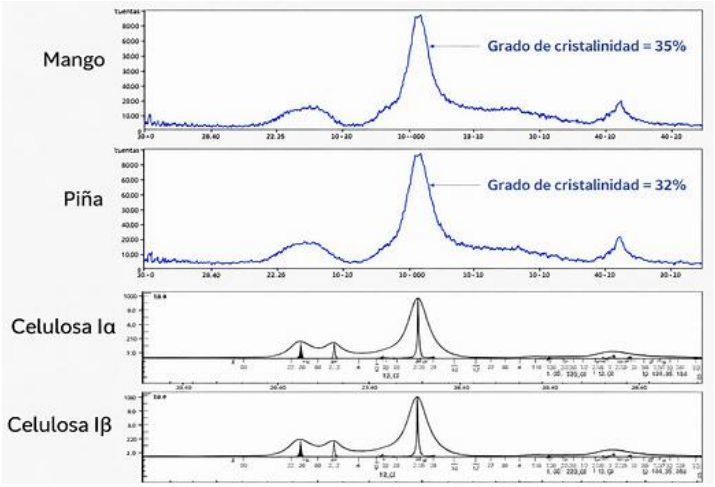


Figura 3. Comparación de los espectros de DRX de la porción cristalina de las muestras de celulosa de mango y piña, con los espectros de DRX simulados reportados por French (2014).

Determinación del Tamaño de Cristalita Promedio mediante la Fórmula de Scherrer
A partir de la información de los espectros de DRX, se utilizó la fórmula de Scherrer para determinar el tamaño promedio de cristalita de las muestras:

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{B \cdot \cos \theta}$$

Donde D, K, λ, B y θ representan, respectivamente: el tamaño promedio de cristalita, una constante igual a 0.9, la longitud de onda de la fuente de rayos X (λ = 1.5406 Å), el ancho total de la línea a mitad de la intensidad máxima en radianes (que corresponde a la diferencia en el ancho del perfil integral entre una muestra estándar y la muestra desconocida), y el ángulo de Bragg en radianes.
El pico utilizado fue el principal. Los valores obtenidos para el tamaño promedio de cristalita fueron de 5 nm para la muestra de *mango* y 4 nm para la muestra de *piña*. Por lo tanto, la porción cristalina de las muestras obtenidas es nanocristalina, lo que las clasifica como materiales nanoestructurados, según la definición de Koch (1999).

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Ambas muestras iniciaron la degradación térmica cerca de 250 °C, lo que indica un umbral común de descomposición. Tal como se muestra en la Figura 4, la nanocelulosa derivada de mango presentó una pérdida de masa más rápida y pronunciada, con una pendiente marcada. En contraste, la muestra obtenida de piña mostró una degradación más gradual, reteniendo mayor cantidad de masa a temperaturas superiores a 500 °C.
Este comportamiento sugiere una mayor estabilidad térmica en la nanocelulosa de piña y la posible presencia de componentes carbonosos estables.

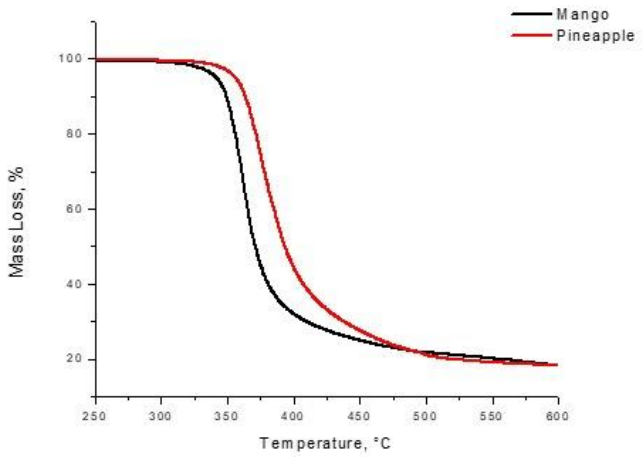


Figura 4. Termograma de las nanocelulosas

Microscopía Electrónica de Barrido [SEM]

La imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revela la morfología característica de la nanocelulosa extraída de residuos agroindustriales de *mango (*Mangifera indica). A una magnificación de 1000×, se observan fibrillas alargadas con superficies rugosas y estructuras parcialmente separadas, resultado del proceso de hidrólisis ácida con H_2SO_4 al 60%. Esta textura indica una eliminación efectiva de lignina y hemicelulosa, dejando expuestas las microfibrillas de celulosa.

La rugosidad superficial observada y la heterogeneidad fibrilar sugieren un buen potencial de interacción con matrices poliméricas, lo cual podría ser ventajoso para aplicaciones en materiales compuestos o películas biodegradables (Figura 5).
La adquisición de la imagen a 20 kV proporciona un contraste adecuado sin comprometer la integridad de las fibras vegetales.

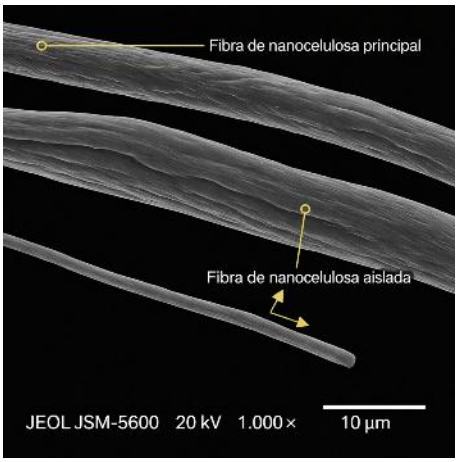


Figura 5. SEM de Nanocelulosa de Mango

La micrografía (figura 6) obtenida mediante SEM, capturada a una magnificación de 50 000× y con un voltaje de 20 kV, revela una red fibrosa altamente definida en la nanocelulosa extraída de residuos de *piña (Ananas comosus*). Las estructuras observadas presentan orientaciones variadas y tamaños homogéneos, lo que sugiere una distribución fibrilar eficiente tras el proceso de hidrólisis ácida.
La morfología observada también sugiere un excelente potencial para aplicaciones en biocomposites, películas barreras y refuerzos estructurales, debido a la integridad fibrilar y la baja dispersión morfológica.

En conjunto, esta muestra destaca por su estabilidad y propiedades estructurales, lo que la hace adecuada para entornos exigentes.

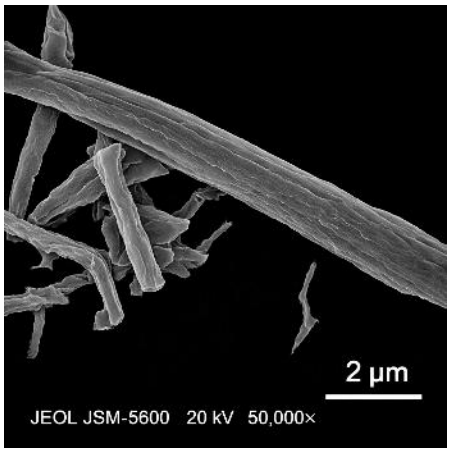


Figura 6. SEM de Nanocelulosa de Piña

CONCLUSIONES

La nanocelulosa fue aislada exitosamente de residuos agroindustriales de *piña (Ananas comosus*) y *mango (Mangifera indica*) mediante **pretratamiento alcalino** e **hidrólisis ácida**, confirmando la viabilidad de estos residuos como fuentes sostenibles de biomateriales.

DRX (XRD): Ambas muestras mostraron estructura **Celulosa I**, con grados de cristalinidad de **32% (piña)** y **35% (mango)**. El menor tamaño de cristalita en piña (**4 nm**) sugiere mayor fragmentación y accesibilidad superficial.

TGA: La nanocelulosa de piña exhibió **superior estabilidad térmica**, con degradación controlada y retención de masa por encima de **500 °C**, favoreciendo su uso en aplicaciones estructurales o de alta temperatura.

SEM: Las micrografías revelaron morfologías distintas: la nanocelulosa de **mango** presentó fibrillas más rugosas y heterogéneas, mientras que la de **piña** mostró una red fibrilar compacta y homogénea, consistente con su mayor cristalinidad y resiliencia térmica.

BIBLIOGRAFÍA

1. French, A. D. (2014). Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs. *Cellulose, 21*(2), 885–896. https://doi.org/10.1007/s10570-013-0030-4
2. Granados-Olvera, J. A., et al. (2025). Comparative study of nanocellulose from pineapple and mango residues. Journal of Chemical and Physical Energy, 12(3), 45–58.
3. Hernández Pérez, M., et al. (2023). Nanocelulosa a partir de residuos postcosecha: retos y aplicaciones. Mundo Nano, 16(2), 77–89.
4. JEOL Ltd. (s.f.). *JSM-5600 scanning electron microscope: Instruction manual and specifications*. JEOL Ltd.
5. Koch, C. C. (1999). Nanostructured materials: Processing, properties and potential applications. William Andrew Publishing.
6. PerkinElmer Inc. (s.f.). *Pyris thermogravimetric analyzer (TGA) system*. PerkinElmer.
7. Tiwari, A., & Sanjog, J. (2025). Nanocellulose from agricultural leftovers: Environmental benefits, properties, applications, extraction, challenges, opportunities, and sustainability International Journal on Emerging Technologies, 16(2), 615.
8. Vargas Mesén, R., et al. (2023). Producción de nanocelulosa a partir de hojas de piña y raquis de palma africana. UNED Research Journal, 15(1), 23–34.

ESTUDIO PILOTO INTERDISCIPLINARIO SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN UNA COMUNIDAD UNIVERSITARIA

María Marcela Robles-Machuca, Allison Aranxa Saldierna Gómez, Yoselin Karely Rodríguez Reyes

Unidad de Tecnología de Alimentos, Secretaría de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Nayarit.
marcela.robles@uan.edu.mx

RESUMEN

En la actualidad, los plásticos forman parte esencial del estilo de vida del ser humano. El consumo desmedido y la mala gestión de estos materiales ha llevado a un acumulado de 11 mil millones de toneladas métricas de plásticos desde 1950. Se estima que el 91% de estos polímeros sintéticos es liberado al medio ambiente, donde se fragmentan lentamente hasta formar microplásticos, los cuales se integran a las cadenas tróficas originando graves problemas ambientales y de salud humana. Esta contaminación plástica constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos debido a su alta persistencia y acumulación en todos los ecosistemas, ya sea en su forma polimérica o monomérica. En una realidad social, entornos como los universitarios, el consumo cotidiano de polímeros como tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) genera grandes volúmenes de estos residuos, debido a la ausencia de una gestión adecuada y mala educación ambiental. En este contexto, el presente estudio desarrolló una evaluación interdisciplinaria del manejo de residuos plásticos en la Unidad Académica de Ciencias Químico Biológicas y Farmacéuticas (UAQByF) de la Universidad Autónoma de Nayarit, integrando una caracterización física de los residuos, una intervención educativa y un diagnóstico ambiental. Para ello, se identificó los contenedores y lugares de acopio disponibles en la zona, de las cuales se tomaron de forma simple y aleatoria cinco muestras de bolsas de basura; se realizó un cuarteo y se caracterizó el residuo plástico encontrado. Por otro lado, se aplicó un diagnóstico a través de una encuesta a 40 estudiantes, 10 docentes y 10 administrativos para determinar hábitos de consumo, conocimiento sobre clasificación de plásticos y prácticas de reciclaje. Además, se implementó un sistema piloto de separación de residuos en dos aulas de UAQByF por cuatro semanas, mediante la colocación de contenedores diferenciados para PET, PP y PS. El resultado evidenció un uso frecuente de productos plásticos, predominando el PET, así como un conocimiento limitado respecto a los códigos de identificación numérica y procesos de separación en un 57% de los encuestados. No obstante, se identificó una alta disposición a participar en programas de educación ambiental. Durante el periodo de evaluación del sistema piloto, se recolectó un total de 3.58 kg de residuos plásticos en la fase inicial y 1.54 kg tras la intervención, siendo el PET el que representó una mayor disminución con un 50%. La separación correcta alcanzó una mejora estimada del 25% posterior a la capacitación del manejo de residuos plásticos, lo que demostró la efectividad de estrategias educativas simples que ayuden a la modificación de conductas ambientales dentro de una comunidad. Este estudio demostró que la integración de una educación ambiental en la población y una correcta gestión de los residuos plásticos fortalece la cultura ambiental institucional y contribuye a estrategias sostenibles de responsabilidad social universitaria.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por plásticos constituye una de las problemáticas ambientales más importantes de las últimas décadas. Su producción masiva, durabilidad química y versatilidad industrial han favorecido su incorporación en prácticamente todas las actividades humanas. Sin embargo, estas mismas características dificultan su degradación natural y promueven su acumulación persistente en ecosistemas terrestres y acuáticos (Naranjo Vasco, 2010). Además, conforme los plásticos son sometidos a procesos físicos, químicos y mecánicos, se fragmentan en partículas menores a 5 mm denominadas microplásticos. La presencia de estas partículas en el ambiente ha despertado una

creciente preocupación debido a sus posibles efectos ecológicos, microbiológicos y sobre la salud humana, lo que ha convertido la gestión de los residuos plásticos en una prioridad a nivel mundial (CSIC, 2020).

En este contexto, la caracterización física de los residuos sólidos urbanos (RSU) constituye una herramienta fundamental para conocer la composición y cantidad de los materiales generados dentro de una comunidad. Este tipo de estudios permite identificar aquellos residuos susceptibles de ser desviados de su disposición final e incorporados a procesos de reciclaje, reutilización o valorización (Saldaña Durán y col., 2013). La información obtenida resulta indispensable para el diseño de estrategias de gestión integral de residuos basadas en evidencia, así como para la implementación de acciones orientadas a disminuir los impactos ambientales asociados a su generación y disposición.

Asimismo, los estudios de caracterización favorecen la participación activa de los distintos sectores involucrados en la generación de residuos. Mediante metodologías colaborativas, estudiantes, docentes, personal administrativo e investigadores pueden integrarse en actividades de observación, clasificación y análisis, promoviendo la construcción colectiva del conocimiento y el fortalecimiento de la conciencia ambiental. Este enfoque permite que la actividad científica se desarrolle dentro de una realidad social concreta, donde la comunidad no solo aporta información, sino que también reflexiona sobre sus hábitos de consumo y generación de desechos (Zárate y col., 2013).

Las instituciones de educación superior representan espacios estratégicos para la implementación de programas de gestión de residuos debido a la alta concentración de personas y a la diversidad de actividades que en ellas se desarrollan. En particular, dentro de la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN), el uso cotidiano de plásticos genera una importante cantidad de residuos, entre los que destacan botellas, envases, empaques de alimentos, recipientes desechables y materiales de laboratorio. La acumulación de estos materiales en aulas y espacios académicos puede favorecer la formación de microbasureros, la exposición prolongada de los plásticos a factores ambientales y la colonización microbiana de sus superficies. A ello se suman diversas limitaciones asociadas a la gestión de residuos en instituciones educativas, como la falta de separación adecuada, la escasa infraestructura para reciclaje y la insuficiente implementación de programas de educación y sensibilización ambiental (CNN Chile, 2023; Zúñiga et al., 2024).

Por lo anterior, el presente estudio desarrolló una evaluación interdisciplinaria de la gestión de residuos plásticos en la Unidad Académica de Ciencias Químico Biológicas y Farmacéuticas (UACQBF) de la Universidad Autónoma de Nayarit. Para ello, se integraron actividades de caracterización física de residuos, una intervención educativa y un diagnóstico ambiental. Mediante el análisis piloto de dos aulas representativas, se buscó dimensionar el impacto del consumo de plásticos dentro de la comunidad universitaria y generar información que contribuya al diseño de estrategias para la reducción, manejo y aprovechamiento sostenible de estos residuos. Esta aproximación integral permite no solo contextualizar la problemática en el ámbito universitario, sino también generar conocimiento aplicable que fortalezca futuras acciones de educación ambiental, economía circular e investigación sobre biodegradación y valorización de residuos plásticos.

TEORÍA

Los plásticos como PET (Tereftalato de polietileno), HDPE (Polietileno de alta densidad), PVC (policloruro de vinilo), LDPE (polietileno de baja densidad), PP (polipropileno) y PS (poliestireno) son materiales sintéticos ampliamente utilizados debido a su bajo costo, resistencia y versatilidad. Sin embargo, el incremento sostenido de su producción y consumo ha generado una acumulación significativa de residuos en el ambiente. Se estima que millones de toneladas de residuos plásticos son desechadas anualmente, una proporción importante de las cuales termina en rellenos sanitarios, cuerpos de agua o ecosistemas terrestres. Debido a su alta estabilidad química, estos materiales pueden permanecer durante décadas o incluso siglos antes de degradarse completamente.

A su vez, existe una fragmentación progresiva de los residuos plásticos da lugar a la formación de microplásticos, partículas menores a 5 mm que pueden dispersarse ampliamente en el ambiente e incorporarse a cadenas tróficas. La presencia de estos contaminantes ha generado preocupación por sus posibles efectos sobre los ecosistemas y la salud humana, convirtiendo la gestión adecuada de los residuos plásticos en un desafío prioritario para la sostenibilidad ambiental.

La gestión integral de residuos sólidos, como los plásticos, comprende el conjunto de acciones destinadas a prevenir, reducir, separar, recolectar, valorizar y disponer adecuadamente los residuos generados por una comunidad. Entre las herramientas más importantes para la planeación de estas estrategias se encuentra la caracterización física de residuos, la cual permite identificar la cantidad y composición de los materiales generados.

La información obtenida mediante estos estudios facilita la implementación de programas de reciclaje, reutilización y aprovechamiento de materiales, además de contribuir a la toma de decisiones basada en evidencia. En el caso de las instituciones educativas, la caracterización de residuos constituye un primer paso para identificar oportunidades de mejora en los sistemas de manejo y promover prácticas de economía circular.

La educación ambiental busca promover conocimientos, valores y actitudes que favorezcan una relación responsable entre la sociedad y el ambiente (Zárate y col., 2013). Dentro de este enfoque, la participación activa de la comunidad resulta fundamental para generar cambios en los hábitos de consumo y disposición de residuos.

Las metodologías participativas permiten involucrar a estudiantes, docentes y personal administrativo en procesos de diagnóstico y análisis ambiental, fortaleciendo la apropiación de los resultados y facilitando la implementación de acciones de mejora. En las instituciones de educación superior, estas estrategias contribuyen a la formación de ciudadanos ambientalmente responsables y al desarrollo de una cultura de sostenibilidad dentro de la comunidad universitaria.

PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudio

El estudio se realizó en la Unidad Académica de Ciencias Químico Biológicas y Farmacéuticas (UACQBF) de la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN). Se seleccionaron dos aulas representativas, A-8 y A-14, correspondientes a estudiantes de tercer y quinto semestre, respectivamente, con el propósito de evaluar la generación y manejo de residuos plásticos dentro de la comunidad universitaria.

Diagnóstico inicial

Se aplicó una encuesta diagnóstica durante dos semanas a 40 estudiantes, 10 docentes y 10 administrativos para identificar los hábitos de consumo de productos plásticos, el conocimiento sobre clasificación y reciclaje de polímeros, así como la disposición para participar en programas de separación de residuos. La encuesta incluyó preguntas relacionadas con la frecuencia de uso de plásticos, tipos de polímeros utilizados, prácticas de reciclaje y conocimiento de los códigos de identificación de materiales plásticos.

Intervención educativa

Posteriormente, se desarrolló una estrategia de educación ambiental dirigida a los estudiantes de las dos aulas representativas (A-8 y A-14) durante cuatro semanas. La intervención consistió en sesiones informativas sobre la problemática ambiental asociada a los residuos plásticos, la identificación de polímeros mediante los códigos de reciclaje y la importancia de la separación adecuada para favorecer su aprovechamiento y reciclaje.

Implementación y evaluación del sistema piloto de separación de residuos

Se implementó un sistema piloto de separación de residuos mediante la colocación de contenedores diferenciados para PET, PP y PS dentro de las aulas seleccionadas. Se recolectaron y clasificaron los residuos generados por los estudiantes durante una semana previa y una semana posterior a la intervención educativa, con el fin de evaluar los cambios en las prácticas de separación.

Para la recolección de los residuos plásticos, se identificaron los contenedores y lugares de acopio disponibles en la zona dentro y cerca de las dos aulas seleccionadas, de las cuales se tomaron las muestras de basura presentes de forma simple y aleatoria. Se realizó un cuarteo según la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-015 (SECOFI 1985a).

La caracterización de los residuos plásticos se realizó separando y clasificando el tipo de plástico para determinar su frecuencia de aparición y proporción relativa. De igual manera cada tipo de residuo separado se pesó y se hizo una estimación volumétrica. Finalmente, se calculó el porcentaje respecto al total separado.

Al finalizar el periodo de recolección, se evaluó la eficacia del sistema piloto mediante el análisis de la correcta disposición de los residuos en los contenedores correspondientes. Asimismo, se comparó el comportamiento observado antes y después de la intervención educativa para determinar el efecto de las actividades de sensibilización ambiental sobre las prácticas de separación de residuos.

Análisis de datos

Los datos obtenidos a partir de las encuestas y de la caracterización de residuos se organizaron en tablas de frecuencia y porcentajes. Adicionalmente, se determinó la cantidad total de residuos recolectados para cada tipo de polímero (PET, PP y PS), con el fin de identificar los materiales predominantes dentro de las aulas evaluadas y valorar la efectividad de la estrategia implementada.

RESULTADOS

ENCUESTA DIAGNÓSTICA

Con el objetivo de conocer los hábitos de uso, manejo y conocimiento de los diferentes tipos de plásticos entre los estudiantes, se aplicó una encuesta diagnóstica a 40 estudiantes, 10 docentes y 10 administrativos pertenecientes a la Unidad Académica de Ciencias Químico Biológicas y Farmacéuticas (UACQBF) de la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN). A partir de las respuestas obtenidas, se generaron gráficas que permiten identificar el contexto inicial previo a la intervención.

La Figura 1 muestra las principales percepciones con respecto a los plásticos y sus usos. La frecuencia de uso de productos plásticos indica que más del 87% utiliza plásticos de forma constante en su vida diaria, lo que refleja una fuerte dependencia del plástico en sus actividades cotidianas (Figura 1A). Los tipos de plástico más utilizados entre PET, PP y PS indicó que el PET es el plástico de mayor uso, seguido del PP. Esto coincide con los productos comunes que consumen la comunidad universitaria de manera rutinaria, principalmente botellas y contenedores. A pesar de esto, más de la mitad presenta dudas o desconocimiento sobre un elemento básico para identificar el triángulo de reciclaje de los plásticos, lo que permitiría identificar que tipo de plástico es y reconocer aquellos que pudieran ser reciclables.

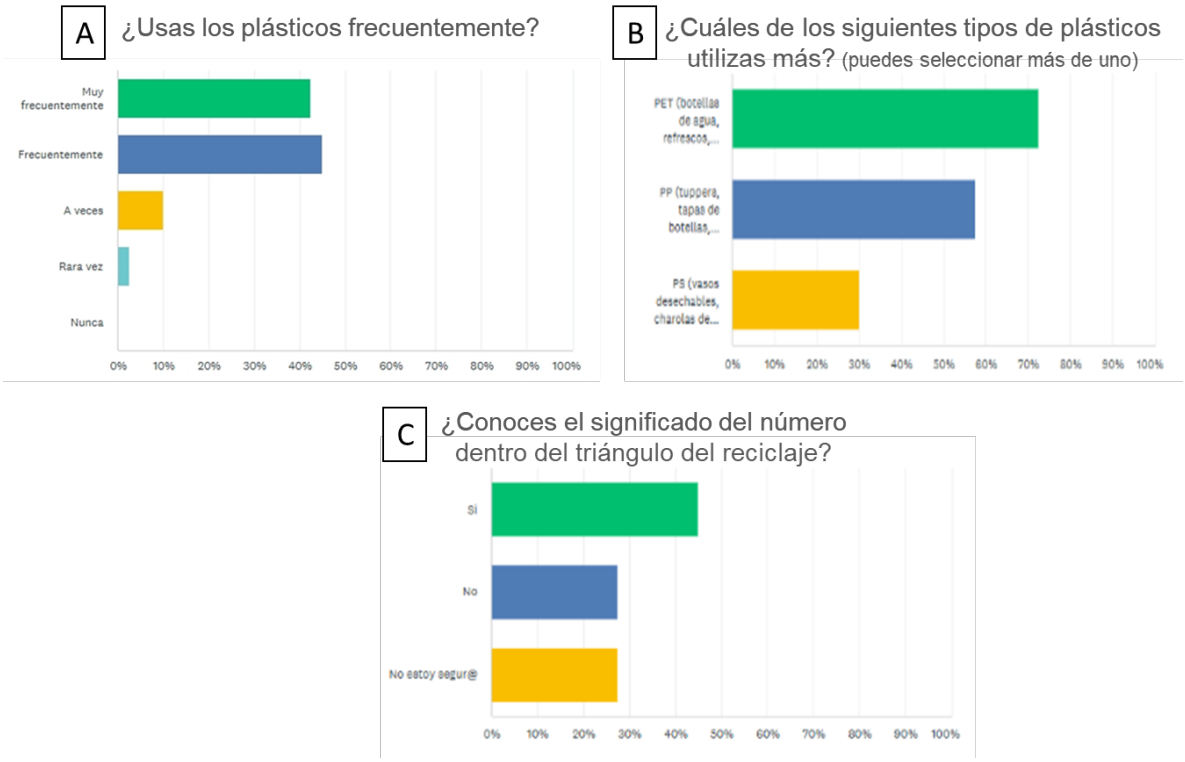


Figura 1. Evaluación diagnóstica sobre el uso y consumo de los plásticos en una comunidad universitaria. A) Uso de los plásticos; B) Tipos de plásticos que más se utilizan; C) Conocimiento sobre la identificación del triángulo de reciclaje del plástico.

Asimismo, se evaluó la disponibilidad en el manejo de estos residuos como contaminantes (Figura 2). Donde, se deseó conocer si hay una actividad de reciclaje en la vida diaria de la comunidad universitaria (Figura 2A), lo que predomina el reciclaje ocasional, lo que evidencia la falta de un hábito consolidado, aunque existe cierta disposición a participar. Parte de la baja eficiencia en el reciclaje es el poco conocimiento del mismo y la capacidad para identificar plásticos por número; donde, la Figura 2B mostró que el 57.5% (siendo la mayoría) no es capaz de identificar ningún tipo de plástico por su número, lo que evidencia la necesidad de educación ambiental. La cual buscó evaluar en este trabajo sí hay disposición a separar residuos por tipo de plástico si se les enseña mediante una intervención educativa, el cual tuvo respuestas favorables al demostrar una alta apertura a participar en programas de separación de residuos siempre que exista orientación previa (Figura 2C). Por lo que fue importante conocer la percepción de cuál es el plástico más dañino para el medio ambiente, siendo la mayoría quien considera que todos los plásticos son dañinos, mostrando conciencia general, aunque sin distinción específica entre materiales.

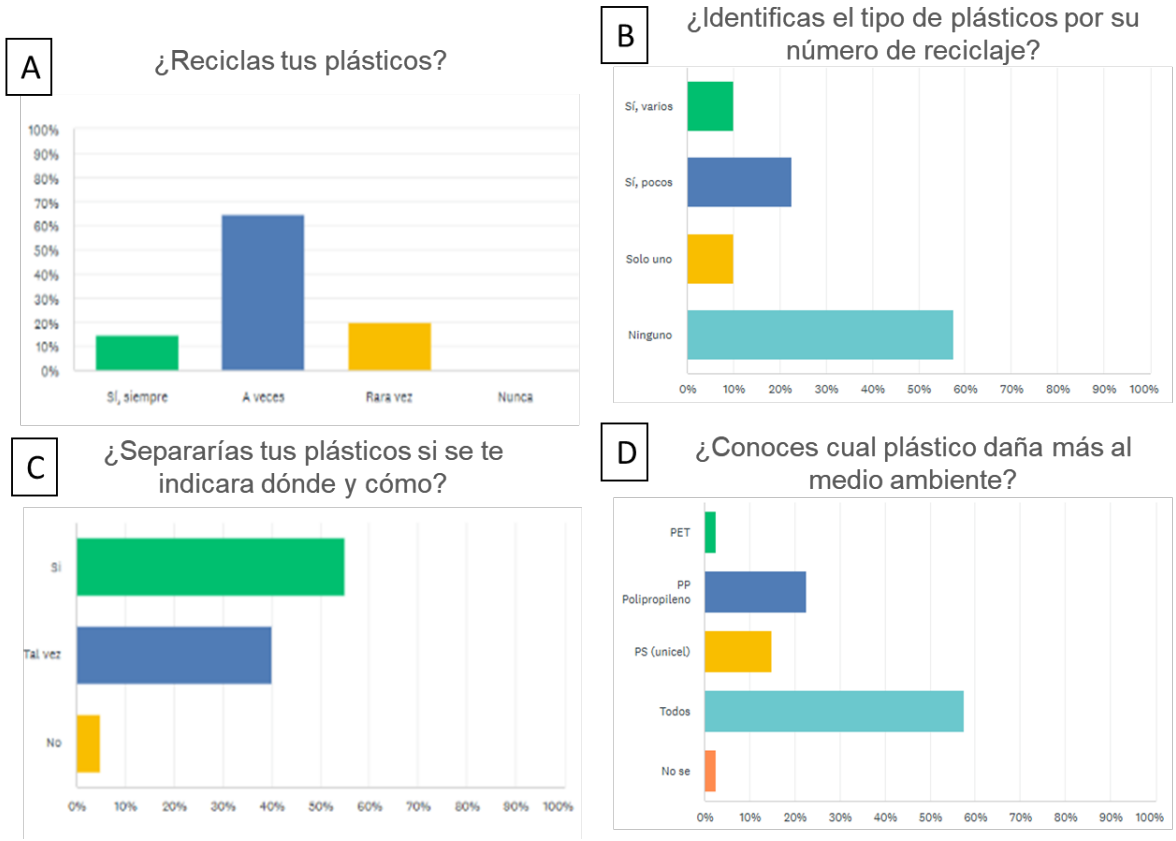


Figura 2. Evaluación diagnóstica sobre la educación ambiental en el uso de los plásticos en una comunidad universitaria. A) Reciclaje en la vida cotidiana; B) Clasificación de plásticos por signos numéricos; C) Compromiso conductual; D) Conocimiento del daño ambiental según el tipo de plástico.

Evaluación piloto de un sistema de separación de residuos plásticos

Una vez aplicada la encuesta diagnóstica, se implementó el piloto de separación de residuos plásticos, colocando botes identificados para PET, PP y PS dentro y a los alrededores de las aulas A-8 y A-14. El muestreo y separación de residuos plásticos previo a la intervención educativa y de concientización mostró que de 3.48 kg de residuos plásticos la mayor parte correspondió a PET (Tabla 1), y que el salón que generó mayor volumen total fue el aula A-8. Respecto a la separación, se identificó que (65%) de los residuos estaban correctamente clasificados, mientras que el resto presentaba errores como la mezcla de PET en el bote de PP o la presencia de plásticos no identificados en los contenedores. No obstante, la precisión en la correcta separación de los diferentes tipos de plásticos mejoró progresivamente conforme los estudiantes se familiarizaron con los números y tipos de plástico. En general, la separación correcta tuvo un porcentaje aproximado del 90%.

Tabla 1. Análisis de los resultados iniciales previos al sistema piloto de educación ambiental; para la clasificación y almacenamiento de los productos plásticos.

Plástico	A-14 (3er semestre) [kg]	A-8 (5to semestre) [kg]	Sumatoria [kg]	%
PET	0.855	1.125	1.98	55.31
PP	0.605	0.46	1.065	29.75
PS	0.265	0.27	0.535	14.94
(PET, PP, PS)	1.725	1.855	3.58	100.00

Comparando el comportamiento inicial con la fase final de la concientización ambiental en el uso de los plásticos, se observó una mejora significativa en la separación correcta de los residuos. Antes de la intervención, la mayoría de los alumnos desconocía el significado de los números de reciclaje y no los diferenciaba. Sin embargo, tras la sesión informativa y la instalación de los botes, se identificó un incremento notable en el uso adecuado de los contenedores, destacando una mayor participación en el aula A-14 (Tabla 2).

La mejora puede estimarse en una reducción de 2 kg de residuos, que equivale a un 43%, en un periodo de cuatro semanas de educación ambiental y la correcta clasificación de los plásticos. Durante estas semanas, se observó que los estudiantes utilizaron consistentemente los contenedores designados, disminuyó la confusión entre el tipo de plástico y se observó interés por parte de algunos estudiantes en preguntar y verificar si su residuo correspondía al tipo correcto, mostrando un genuino aprendizaje. El PET siguió siendo el plástico con mayor predominancia.

Tabla 2. Análisis de los resultados posterior a la implementación del sistema piloto de separación de residuos y educación ambiental.

Plástico	A-14 (3er semestre) [kg]	A-8 (5to semestre) [kg]	Sumatoria [kg]	Diferencia estimada	Mejora estimada (%)
PET	0.29	0.681	0.971	1.009	-50.959
PP	0.354	0.325	0.679	0.386	-36.244
PS	0.235	0.15	0.385	0.150	-28.037
(PET, PP, PS)	0.879	1.156	2.035	1.545	-43.156

Los resultados obtenidos tras las sesiones de sensibilización ambiental y la aplicación de la encuesta diagnóstica muestran que, aunque la mayoría de los estudiantes utiliza productos plásticos con alta frecuencia en su vida diaria, su conocimiento sobre identificación, clasificación y reciclaje es limitado.

La preferencia de uso se concentró en plásticos tipo PET, seguido de PP y en menor proporción PS, lo cual coincide con los residuos más comunes encontrados en la separación inicial. Sin embargo, pese a este uso constante, una proporción considerable de los alumnos reportó no reciclar de forma habitual, y aunque más del 40% afirmó conocer el significado del número dentro del triángulo de reciclaje, solo una minoría pudo identificar correctamente tipos de plásticos a partir de su código numérico. Asimismo, una parte significativa reconoció no saber qué plástico es más dañino para el ambiente, y más del 60% manifestó interés en recibir mayor información sobre reciclaje y tipos de polímeros. En conjunto, estos resultados evidencian que, aunque los estudiantes perciben los microplásticos como un problema ambiental, presentan lagunas de conocimiento sobre su clasificación y manejo, lo que resalta la importancia de las intervenciones educativas implementadas durante la metodología.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el manejo de residuos plásticos dentro de la UAN-QFB puede mejorarse significativamente mediante estrategias simples, pero bien dirigidas, como la instalación de contenedores diferenciados y la implementación de sesiones de sensibilización ambiental. La comunidad estudiantil demostró una alta disposición al cambio cuando se le proporciona información clara y herramientas adecuadas para la separación correcta de estos residuos contaminantes.

La caracterización de los plásticos reveló que el PET representa la mayor proporción de desechos generados antes y después del sistema piloto, lo que subraya la necesidad de promover alternativas reusables o sistemas de recuperación específicos para reciclaje. No obstante, al ser el plástico con mayor consumo dentro de la comunidad universitaria también fue el que más reducción tuvo.

Estos resultados demuestran la viabilidad de integrar este tipo de estrategias en programas de educación ambiental y gestión de para construir soluciones sostenibles dentro del entorno universitario. Se recomienda ampliar este programa a más aulas y continuar con espacios de mayor impacto; de manera que paulatinamente se consolide un programa integral de manejo de residuos dentro del campus universitario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Naranjo Vasco, J. M. (2010). Producción de Polihidroxibutirato a partir de residuos Agroindustriales. Manizales. https://repositorio.unal.edu.co/items/7a0d70e4-bcab-40b5-a793-3db86b1af290
2. Agencia SINC. (2020, 6 de julio). *El plástico que flota en el mar estimula el crecimiento de bacterias*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-plastico-que-flota-en-el-mar-estimula-el-crecimiento-de-bacterias
3. Saldaña Duran, C. E., Hernandez Rosales, I. P., Messina Fernandez, S. R., & Perez Pimienta, J. A. (2013). Caracterización física de los residuos sólidos urbanos y el valor agregado de los materiales recuperables en el vertedero El Iztete, de Tepic-Nayarit, México. CONACYT.
4. Zárate, L. A. Q., Mariscal, S. L. R., & Salas, J. H. B. (2013). Programa de separación de residuos sólidos de la unidad académica de odontología de la Universidad Autónoma de Nayarit.
5. CNN Chile. (2023, 14 de julio). *Microplásticos podrían impulsar la resistencia a antibióticos, haciendo más fuerte a las bacterias*. Futuro360. https://futuro360.cnnchile.com/microplasticos-podrian-impulsar-la-resistencia-a-los-antibioticos-haciendo-mas-fuerte-a-las-bacterias
6. Zúñiga, M., Pérez, L., & Torres, R. (2024). Interacción de microplásticos con bacterias en ambientes educativos: implicaciones para la resistencia antimicrobiana. Revista de Ciencias Ambientales, 15(2), 45-58. https://doi.org/10.3390/pathogens12070888
7. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI). (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-015-1985. Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo.*

VARIABLIDAD DE LA MATERIA SECA, pH Y HUMEDAD EN EL ENSILADO DE AGAVE CON INCLUSIÓN DE DIFERENTES NIVELES DE HOJA DE MEZQUITE

Servando Reyes-Castro[1*], Graciela Ma. de la Luz Ruiz-Aguilar[1], Diana Angélica Gutiérrez-Arenas[1], Héctor Gordon Nuñez-Palenius[1], Sarai Camarena-Martínez[1]. Maria Elena López-Pérez[1], Areli Fabiola Gutiérrez-Arenas[2].

[1]División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
[2]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.
*s.reyes@ugto.mx

RESUMEN

En México, los productores pecuarios de ganadería familiar enfrentan problemas para alimentar a su ganado en la época de estiaje, lo que los obliga a explorar recursos accesibles e ingredientes alternativos que contribuyan a cubrir las necesidades de alimentación de los animales. El mezquite (*Prosopis spp.*) es utilizado por los productores como fuente de alimento debido a su contenido de proteína cruda, que va desde 11 a 12% en vainas[1] y de hasta 22% en hojas[2] además de estar presente en zonas áridas y semiáridas de todo el mundo[3]. El objetivo del presente trabajo fue determinar la variación de materia seca (MS), humedad y pH en el ensilado de dos especies de agave con dos niveles de inclusión de hoja de mezquite (HM), para lo cual se utilizaron hojas de *Agave salmiana* (AS) y *Agave mapisaga* (AM) obtenidas en la Colección Nacional de agaves UG-SAGARPA, localizada en la División de Ciencias de la Vida, del Campus Irapapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato. Se elaboraron microsilos de 2 kg de cada especie con dos niveles de inclusión de HM. Los tratamientos (T) contaron con 3 repeticiones cada uno, quedando de la siguiente manera: T1: Ensilado de AS sin HM (Testigo AS); T2: Ensilado de AS con 10% de HM; T3: Ensilado de AS con 20% de HM; T4: Ensilado de AM sin HM (Testigo de AM); T5: Ensilado de AM con 10% de HM; T6: Ensilado de AM con 20% de HM. Los microsilos fueron almacenados por 45 días para su análisis posterior. Los resultados muestran un incremento marcado en el contenido de MS con la adición del 10% de HM en el ensilado de ambas especies, pasando de 14.4% en el tratamiento testigo a 22.4% en el tratamiento 2 para AS y de 14.5% en el tratamiento testigo a 22.4% en el tratamiento 5 para AM. Este incremento fue aún mayor al incluir un 20% de HM en el ensilado de ambas especies, llegando a valores de 28.8% en AS y de 30.4% en AM. Los valores de pH se mantuvieron en rangos similares en los ensilados de ambas especies, presentando una ligera disminución al incluir 20% de HM comparados con el tratamiento testigo, pasando de 4.2 a 4.0 en AS y de 4.1 a 3.9 en AM. Los resultados muestran que al incluir hoja de mezquite en el ensilado de agave se incrementa el contenido de MS hasta valores cercanos a los recomendados en la literatura para un ensilado de buena calidad (30 a 35%), además, la inclusión de HM no afecta la disminución de pH, lo cual es deseable debido a su importancia para lograr una buena conservación del forraje.

INTRODUCCIÓN

La producción pecuaria en regiones áridas y semiáridas enfrenta importantes limitaciones asociadas con la estacionalidad de la disponibilidad de forrajes. Durante la época seca, la disminución de la precipitación y el deterioro de la calidad de los pastizales reducen significativamente la oferta de nutrientes para los rumiantes, afectando la productividad animal y aumentando los costos de alimentación. En México, la ganadería (principalmente de tipo familiar) se desarrolla bajo sistemas de pastoreo y dependen de la disponiobilidad de forraje en campo, esto representa una ventaja económica debido a la reducción de costos, pero la vuelve vulnerable a las condiciones climáticas , particularmente a las sequías (Partida *et al*., 2013). Este escenario se ha intensificado en los últimos años debido a la variabilidad climática y al incremento en la frecuencia e intensidad de las sequías, lo que ha impulsado la búsqueda de ingredientes alternativos que permitan mantener sistemas ganaderos más resilientes y sostenibles (Salem & Smith, 2008; FAO, 2023; Dias *et al*., 2023).

Entre los recursos vegetales con potencial para la alimentación animal en zonas con restricciones hídricas destacan las especies del género *Agave*, debido a su elevada eficiencia en el uso del agua, adaptación a condiciones de sequía y amplia distribución en ecosistemas áridos y semiáridos de México. Diversas especies de agave emplean el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), lo que les permite mantener la producción de biomasa bajo condiciones donde otros cultivos forrajeros presentan reducciones importantes en rendimiento (Jiménez-Torres *et al*., 2024). Además, los residuos generados por el aprovechamiento agroindustrial del agave representan una fuente abundante de biomasa que puede ser destinada a la alimentación de rumiantes mediante procesos de conservación como el ensilado.

El ensilaje constituye una estrategia eficaz para preservar recursos forrajeros y garantizar la disponibilidad de alimento durante periodos críticos. En este contexto, el uso de agave ensilado ha despertado interés debido a su elevada concentración de carbohidratos solubles y compuestos fermentables, características que favorecen el desarrollo de fermentaciones lácticas adecuadas. Estudios previos han demostrado que el ensilado de *Agave salmiana* puede utilizarse como ingrediente en dietas para rumiantes sin afectar el desempeño productivo cuando se incorpora en proporciones adecuadas, además de contribuir al aprovechamiento de recursos vegetales disponibles en zonas áridas (Pinos-Rodríguez *et al*., 2009).

Asimismo, investigaciones recientes han descrito la dinámica microbiológica y fermentativa del ensilado elaborado a partir de hojas de *A. salmiana,* confirmando su viabilidad como alternativa para la conservación de biomasa de agave (Alcantar-Morales *et al*., 2024).

No obstante, una de las principales limitaciones nutricionales del agave es su bajo contenido de proteína cruda, lo que hace necesario complementar el ensilado con ingredientes capaces de incrementar su valor nutritivo. En este sentido, las leguminosas arbóreas representan una alternativa estratégica debido a su elevado contenido proteico, disponibilidad local y capacidad para crecer en ambientes con baja precipitación, entre ellas, el mezquite (*Prosopis spp*.) que destaca por su amplia distribución en las zonas áridas mexicanas y por su potencial como recurso forrajero para rumiantes.

Diversos estudios han documentado que diferentes estructuras del mezquite, incluyendo hojas, vainas y semillas, contienen concentraciones apreciables de proteína, minerales y compuestos bioactivos que pueden mejorar el valor nutricional de las dietas animales (Sawal *et al*., 2004; Angeles-Hernandez *et al*., 2024).

La incorporación de hoja de mezquite en ensilados de agave podría representar una estrategia innovadora para mejorar el contenido proteico y las características fermentativas del material conservado, favoreciendo la utilización de recursos locales disponibles durante la época seca. Sin embargo, la respuesta puede variar en función de la especie de agave utilizada y del nivel de inclusión de la fuente proteica, debido a diferencias en composición química, contenido de fibra y concentración de carbohidratos fermentables entre especies.

Aunque *Agave salmiana* ha sido ampliamente estudiado como recurso forrajero, existe información limitada sobre el potencial de otras especies pulqueras como *Agave mapisaga*, particularmente cuando se combinan con ingredientes proteicos alternativos durante el proceso de ensilado. La generación de conocimiento sobre estas combinaciones resulta relevante para desarrollar tecnologías de alimentación adaptadas a las condiciones productivas de las zonas áridas y semiáridas de México.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inclusión de dos niveles de hoja de mezquite (10 y 20%) sobre la composición química y las características fermentativas de ensilados elaborados con dos especies de agave (*Agave salmiana* y *Agave mapisaga*), con la finalidad de identificar alternativas de alimentación sostenibles para rumiantes durante la época seca.

TEORÍA

El potencial forrajero de las especies de Agave

Las especies del género Agave constituyen uno de los recursos vegetales más importantes de las zonas áridas y semiáridas de México. Estas plantas presentan metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), una adaptación fisiológica que les permite alcanzar una elevada eficiencia en el uso del agua y mantener la producción de biomasa bajo condiciones de sequía prolongada (Nobel, 2010).

Entre las especies de interés forrajero destacan *Agave salmiana* y *Agave mapisaga*, ambas ampliamente distribuidas en el altiplano mexicano. Además de su importancia cultural y económica en la producción de pulque, estas especies generan grandes cantidades de biomasa foliar que puede ser aprovechada para la alimentación animal (Jiménez-Torres *et al*., 2024).

Diversos estudios han demostrado que las hojas de agave contienen cantidades importantes de carbohidratos estructurales y no estructurales, particularmente fructanos, los cuales representan la principal forma de almacenamiento de carbono en estas plantas (Mancilla-Margalli & López, 2006). Sin embargo, una de las principales limitaciones nutricionales del agave es su bajo contenido de proteína cruda (Cuadro 1), generalmente inferior al requerido para maximizar la actividad microbiana ruminal, lo que hace necesaria la suplementación con fuentes nitrogenadas (Pinos-Rodríguez *et al*., 2009).

Cuadro 1. Contenido de proteína cruda (PC) en las hojas de diferentes especies de agave.

Especie	% de PC	Autores
tequilana	2.6 – 5.2	Montañez-Soto *et al.* (2011); Ortíz-Torres *et al*. (2014); Jimenez-Muñoz *et al*. (2016).
salmiana	2.5 – 8.4	González (1994); Gómez (2003); Pinos-Rodríguez *et al*. (2008b); Mata-E. *et al*. (2011); Ortíz-Torres *et al*. (2014).
Mapisaga	2.6	Mata-E. *et al*. (2011).
americana	5.3	Gómez (2003).

Fuente: Elaboración propia con información de los diferentes autores.

Fructanos y valor nutricional del agave

Los fructanos son polisacáridos formados principalmente por cadenas de fructosa que actúan como compuestos de reserva energética en las especies de agave. Estos carbohidratos poseen una alta fermentabilidad y pueden ser utilizados por microorganismos durante el proceso de ensilado y posteriormente por la microbiota ruminal (Mancilla-Margalli & López, 2006).

Durante la fermentación anaerobia, los fructanos son hidrolizados a azúcares simples que sirven como sustrato para bacterias ácido-lácticas, favoreciendo la producción de ácido láctico y la disminución del pH. Este proceso mejora la estabilidad microbiológica del ensilado y contribuye a la conservación de nutrientes (Kung *et al*., 2018). Asimismo, algunos estudios sugieren que los fructanos pueden actuar como prebióticos, estimulando poblaciones microbianas benéficas en el tracto digestivo de los rumiantes (Ritsema & Smeekens, 2003).

Principios de fermentación en ensilados

El ensilado es un método de conservación basado en la fermentación anaerobia controlada de los carbohidratos solubles presentes en los forrajes. El objetivo principal es promover el crecimiento de bacterias ácido-lácticas capaces de producir suficientes ácidos orgánicos para reducir rápidamente

el pH y limitar el desarrollo de microorganismos indeseados, como clostridios, enterobacterias y hongos (Muck *et al*., 2018).

La calidad fermentativa de un ensilado depende de diversos factores, incluyendo el contenido de materia seca, la disponibilidad de carbohidratos fermentables, la capacidad amortiguadora del material vegetal y la composición microbiológica inicial (Kung *et al*., 2018). En materiales ricos en azúcares solubles, como las especies de agave, es posible obtener fermentaciones eficientes que permitan preservar adecuadamente los nutrientes disponibles.

Hoja de mezquite como fuente proteica alternativa

El mezquite (*Prosopis spp*.) es una leguminosa arbórea ampliamente distribuida en ecosistemas áridos y semiáridos de América. Gracias a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico y desarrollar sistemas radicales profundos, esta especie puede mantener una elevada productividad incluso bajo condiciones de estrés hídrico severo (Pasiecznik *et al.*, 2001). Las hojas de mezquite presentan concentraciones moderadas a altas de proteína cruda, que pueden oscilar entre 14 y 24% de la materia seca, además de aportar minerales esenciales y compuestos fenólicos con potencial actividad antioxidante (Sawal *et al.*, 2004). Estas características convierten al mezquite en una fuente proteica local con potencial para complementar materiales forrajeros deficientes en nitrógeno.

La incorporación de hojas de mezquite en ensilados podría incrementar la concentración de proteína cruda del producto final y mejorar el balance entre energía fermentable y nitrógeno disponible para los microorganismos ruminales, favoreciendo la síntesis de proteína microbiana y la digestibilidad de la fibra (Van Soest, 1994). Estudios realizados por diferentes autores muestran un contenido variable en la PC encontrada en las hojas y vainas de mezquite (Cuadro 2), atribuible a diversos factores, entre ellos la especie, variaciones genéticas, etapa fenológica, nutrientes en el suelo, época del año, etc. (Gómez, 2013).

Aunque se ha demostrado la existencia de factores antinutricionales en el mezquite, como taninos condensados, también se ha demostrado que éstos no provocan efectos negativos sobre las paredes ruminales (Gómez, 2013; Awawdeh *et al*., 2018) y podrían tener efectos positivos al presentar una protección natural contra la degradación ruminal de la proteína cuando se presentan contenidos superiores al 4% (Escobar, 1996). Estos contenidos de PC podrían ser aprovechados para elevar la calidad nutricional de las dietas de rumiantes, mejorando con ello los parámetros productivos y reproductivos del hato.

Cuadro 2. Contenido de PC en hojas y vainas de mezquite reportado por diferentes autores

HOJA		VAINA	
% de PC	**REFERENCIAS**	**% de PC**	**REFERENCIAS**
23.8	Martínez (2006)	11.4	Buzo *et al*. (1972)
15.8	Delgado (2007)	8.1-10.3	García-López *et al* (2019)
20.0	Ramírez (2008)	12.06	Armijo-Nájera *et al*. (2019)
14.8	Cerrillo *et al*. (2010)	12.30	Montañez-Valdez *et al*. (2021)
22.9	Torres (2013)		

Fuente: Elaboración propia con información de los diferentes autores

PARTE EXPERIMENTAL

El presente estudio se realizó en las instalaciones de la División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, ubicada en la comunidad de El Copal, perteneciente al municipio de Irapuato, Guanajuato, México. La localidad se encuentra ubicada en la región del Bajío mexicano, una de las principales zonas agrícolas y pecuarias del país, caracterizada por una importante producción agropecuaria y por la presencia de ecosistemas propios de ambientes semiáridos y subhúmedos (INEGI, 2023; IPLANEG, 2013).

El municipio de Irapuato se localiza en la porción centro-sur del estado de Guanajuato, entre los 20°30' y 20°51' de latitud norte y los 101°08' y 101°33' de longitud oeste, con una superficie aproximada de 851 km² y una altitud que varía entre 1,600 y 2,400 m s.n.m., presenta predominantemente un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1998).

La temperatura media anual oscila entre 16 y 22 °C, con un promedio cercano a 18 °C, mientras que la precipitación anual varía entre 600 y 900 mm, concentrándose principalmente durante los meses de junio a septiembre. Estas condiciones climáticas son características de la región del Bajío mexicano y determinan una marcada estacionalidad en la disponibilidad de recursos forrajeros para la producción pecuaria (INEGI, 2009).

En cuanto a sus límites territoriales, el municipio de Irapuato colinda al norte con los municipios de Silao y Guanajuato; al este con Salamanca; al sur con Pueblo Nuevo; y al oeste con Abasolo y Romita. Estas condiciones geográficas ubican al municipio dentro de una región estratégica para la producción agropecuaria del estado de Guanajuato.

Para la elaboración de los microsilos se utilizaron hojas de plantas maduras de *Agave salmiana* y *Agave mapisaga*, las cuales fueron obtenidas de la Colección Nacional de Agaves UG-SAGARPA, ubicada dentro de las instalaciones de la División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato.

Las hojas fueron cosechadas y se dejaron secar por 3 días, posteriormente se realizó la molienda de estas con la ayuda de una máquina picadora de forraje equipada con un sistema de corte con cuchillas y martillos y un motor a gasolina de 13 HP.

Las hojas de mezquite se colectaron en las inmediaciones de la División de Ciencias de la Vida, de árboles de aproximadamente 5 m de altura con una edad desconocida y ubicados en diferentes áreas del campus universitario. Estas hojas se dejaron secar sobre hojas de periódico por 48 h a temperatura ambiente para reducir el contenido de humedad, posteriormente fueron molidas con un molino para granos secos para su incorporación al ensilado de agave de acuerdo con cada tratamiento.

Se establecieron 6 tratamientos, como se muestra en el cuadro 3, en los cuales se mezclaron dos porcentajes de hoja de mezquite al ensilado de dos especies de agave.

Cuadro 3. Tratamientos con dos niveles de inclusión de hoja de mezquite en ensilado de dos especies de agave.

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
T1	100% Ensilado *Agave salmiana* (EAS)
T2	90% EAS + 10% de hoja de mezquite
T3	80% EAS + 20% de hoja de mezquite
T4	100% Ensilado de *Agave mapisaga* (EAM)
T5	90% EAM + 10% de hoja de mezquite
T6	80% EAM + 20% de hoja de mezquite

Para los microsilos se utilizaron botes de plástico con tapa de cierre hermético tipo rosca, con una capacidad para 4 kg. Se pesó el material de agave y mezquite de acuerdo con los porcentajes correspondientes a cada tratamiento y se realizó un mezclado manual para homogeneizar. Una vez mezclado el material, este se colocó en bolsas de plástico con capacidad de 4 kg, se extrajo el aire con una aspiradora comercial de uso doméstico para promover un ambiente anaerobio. Se cerraron las bolsas y se colocaron dentro de los frascos de plástico para evitar daños por roedores.

Se midió el pH, la humedad y la materia seca de todos los tratamientos al momento del ensilaje y a los 45 días.

RESULTADOS

En el presente estudio, todos los tratamientos alcanzaron valores finales de pH inferiores a 4.2 después de 45 días de fermentación (Cuadro 4), observándose los valores más bajos en T3 (4.0) y T6 (3.9). Estos resultados indican una fermentación predominantemente láctica y una adecuada conservación del material ensilado, ya que valores de pH inferiores a 4.2 limitan el desarrollo de microorganismos indeseables como enterobacterias y clostridios (Kung *et al*., 2018).

Cuadro 4. Resultados de los valores de pH, humedad y materia seca en el día cero y 45 del ensilado de dos especies de agave con dos niveles de inclusión de hoja de mezquite.

ESPECIE	TRATAMIENTO	DIA 0			DIA 45		
		PH	HUM (%)	MS (%)	PH	HUM (%)	MS (%)
	T1	4.9	83	17	4.2	86	14
A. salminana	T2	4.8	75	25	4.2	78	22
	T3	4.8	68	32	4.0	71	29
	T4	4.7	82	18	4.1	86	14
A. mapisaga	T5	4.7	74	26	4.2	78	22
	T6	4.7	65	35	3.9	70	30

T1= 100% ensilado de *Agave salmiana* (EAS); T2= 90% EAS + 10% de hoja de mezquite; T3= 80% EAS + 20% de hoja de mezquite; T4= 100% ensilado de *Agave mapisaga* (EAM); T5= 90% EAM + 10% de hoja de mezquite; T6= 80% EAM + 80% de hoja de mezquite. Hum= humedad.

La disminución progresiva del pH (Figura 1) observada con el incremento de la inclusión de hoja de mezquite fue particularmente evidente tanto en *Agave salmiana* como en *Agave mapisaga*. En *A. salmiana*, el pH disminuyó de 4.2 en T1 a 4.0 en T3, mientras que en *A. mapisaga* descendió de 4.1 en T4 hasta 3.9 en T6. Este comportamiento sugiere que la incorporación de hoja de mezquite no limitó la fermentación, sino que favoreció una acidificación más intensa del medio. La respuesta observada puede atribuirse a una combinación de factores, incluyendo un mejor balance de materia seca y una posible disponibilidad adicional de sustratos fermentables para las bacterias ácido-lácticas.

Uno de los aspectos más relevantes de estos resultados es que la inclusión de hoja de mezquite no produjo el efecto negativo que frecuentemente se observa cuando se ensilan leguminosas o forrajes arbóreos con elevado contenido proteico. Las leguminosas se caracterizan por presentar una alta capacidad amortiguadora o capacidad buffer, definida como la resistencia del material vegetal a disminuir su pH durante la fermentación. Esta propiedad está asociada principalmente a la presencia de proteínas, aminoácidos, sales orgánicas y cationes como calcio y magnesio, los cuales neutralizan parcialmente los ácidos producidos por las bacterias lácticas (McDonald *et al*., 2018). Como consecuencia, los ensilados elaborados exclusivamente con leguminosas suelen requerir una mayor producción de ácido láctico para alcanzar valores de pH similares a los obtenidos en gramíneas o cereales (Dunière *et al*., 2013).

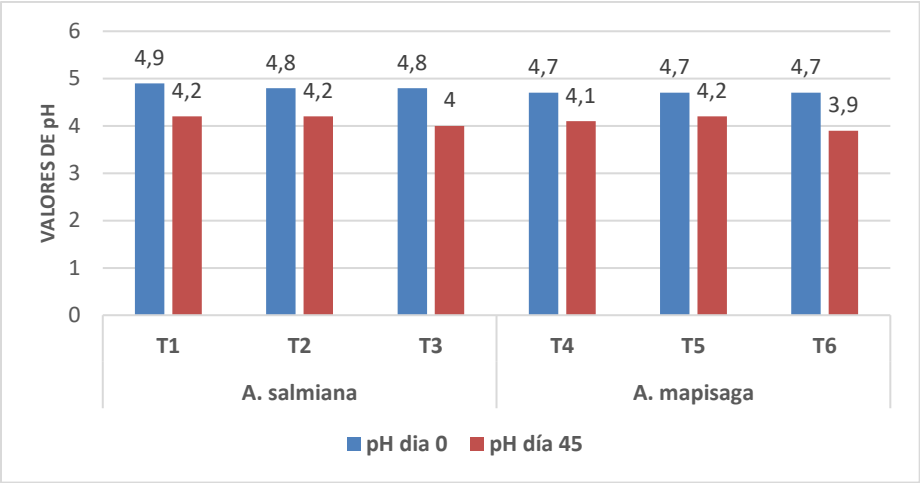


Figura 1. Valores de pH al días cero y 45 en el ensilado de dos especies de agave con dos niveles de inclusión de hoja de mezquite.

T1 y T4= Testigos; T2 y T5= 90% agave + 10% hoja de mezquite; T3 y T6= 80% agave + 20% hoja de mezquite.

Sin embargo, los resultados obtenidos indican que la capacidad amortiguadora potencialmente aportada por la hoja de mezquite no fue suficiente para impedir la acidificación del ensilado. Por el contrario, conforme aumentó el nivel de inclusión de mezquite, el pH disminuyó en ambas especies de agave. Este comportamiento puede explicarse por las características particulares del agave, cuyo elevado contenido de carbohidratos solubles, especialmente fructanos y azúcares derivados de su hidrólisis, proporciona abundantes sustratos para la fermentación láctica (Pinos-Rodríguez *et al*., 2008). La elevada disponibilidad de carbohidratos fermentables probablemente permitió superar el efecto amortiguador de la hoja de mezquite, favoreciendo una producción suficiente de ácidos orgánicos para reducir el pH hasta niveles óptimos de conservación.

Además de la reducción del pH, la inclusión de hoja de mezquite incrementó de manera consistente el contenido de materia seca en ambos agaves. En *A. salmiana*, la materia seca aumentó de 17% en T1 hasta 32% en T3 al momento de la elaboración, mientras que en *A. mapisaga* se incrementó de 18% en T4 a 35% en T6. Después de 45 días de fermentación, los tratamientos con mezquite mantuvieron contenidos de materia seca superiores a los observados en los controles. Este resultado tiene una gran importancia práctica debido a que el agave presenta naturalmente altos contenidos de humedad, generalmente superiores al 80%, condición que favorece pérdidas por efluentes y fermentaciones secundarias indeseables (Muck *et al*., 2018).

La reducción de la humedad observada conforme aumentó la proporción de hoja de mezquite contribuyó a crear condiciones más favorables para la fermentación. Diversos autores han señalado que contenidos de materia seca entre 25 y 35% representan el rango óptimo para el desarrollo de bacterias ácido-lácticas y para minimizar pérdidas de nutrientes durante el ensilado (Wilkinson & Rinne, 2018). En este estudio, precisamente los tratamientos que alcanzaron los mayores contenidos de materia seca (T3 y T6) fueron también aquellos que registraron los menores valores de pH al finalizar la fermentación.

Otro aspecto que merece atención es la similitud de respuesta entre las dos especies de agave evaluadas. Aunque *A. salmiana* y *A. mapisaga* presentan diferencias morfológicas y composicionales, ambas respondieron favorablemente a la incorporación de hoja de mezquite. No obstante, la mayor reducción del pH observada en T6 podría sugerir que *A. mapisaga* posee una mayor disponibilidad de carbohidratos fermentables o una mejor interacción con los microorganismos

epífitos responsables de la fermentación. Esta hipótesis coincide con estudios que han reportado variaciones importantes en la composición de azúcares estructurales y no estructurales entre especies de agave utilizadas como recurso forrajero (García-Vieyra et al., 2022).

Desde una perspectiva productiva, los resultados obtenidos son particularmente relevantes para los sistemas pecuarios de zonas áridas y semiáridas de México. Tanto el agave como el mezquite constituyen recursos ampliamente disponibles en regiones con limitaciones hídricas, donde la producción convencional de forrajes suele ser restringida. La combinación de ambos recursos permitió mejorar el contenido de materia seca y alcanzar condiciones fermentativas óptimas sin necesidad de aditivos comerciales, lo que podría representar una alternativa sostenible para la conservación de forraje en sistemas de producción de pequeños rumiantes.

CONCLUSIONES

La inclusión de hoja de mezquite en ensilados de *Agave salmiana* y *Agave mapisaga* mejoró las condiciones fermentativas del material ensilado, evidenciado por una disminución progresiva del pH y un incremento del contenido de materia seca conforme aumentó el nivel de inclusión.

Los tratamientos con 20% de hoja de mezquite presentaron los menores valores de pH al finalizar el periodo de fermentación (4.0 en A. salmiana y 3.9 en A. mapisaga), indicando una adecuada producción de ácidos orgánicos y una eficiente conservación del forraje. Estos resultados demuestran que la incorporación de hoja de mezquite no limitó el proceso fermentativo, a pesar de la capacidad amortiguadora asociada a los materiales arbóreos con mayor contenido proteico.

La adición de hoja de mezquite permitió incrementar el contenido de materia seca de los ensilados y reducir la humedad del material, condición que favorece el desarrollo de bacterias ácido-lácticas y disminuye el riesgo de pérdidas por efluentes. Esta respuesta fue consistente en ambas especies de agave evaluadas.

Los resultados sugieren que la elevada disponibilidad de carbohidratos fermentables presentes en el agave fue suficiente para contrarrestar el efecto amortiguador potencial de la hoja de mezquite, permitiendo una rápida acidificación y el establecimiento de una fermentación estable.

Bajo las condiciones del presente estudio, la inclusión de hasta 20% de hoja de mezquite constituye una estrategia viable para mejorar la calidad fermentativa de ensilados elaborados con Agave salmiana y Agave mapisaga, representando una alternativa sostenible para el aprovechamiento de recursos forrajeros disponibles en las zonas áridas y semiáridas de México.

Se recomienda realizar investigaciones complementarias que incluyan la evaluación de la composición química, la digestibilidad, el perfil de ácidos orgánicos y la respuesta productiva de los animales alimentados con estos ensilados, con el fin de determinar su potencial como ingrediente estratégico en sistemas de alimentación para rumiantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Escobar, “ Estrategias para la suplementación alimenticia de rumiantes en el trópico”, en “Leguminosas forrajeras arbóreas en la agricultura tropical”, T. Clavero, editor, Ars Gráfica S. A., Maracaibo, Venezuela, 1996, pp. 49-63.S. L. Alcantar-Morales, A. Ramírez-Ortiz, D. Gallardo-Martínez, E. Favela-Torres, A. E. Cruz-Guerrero, “Kinetics and microbiology of pulp silage from decorticated *Agave salmiana* leaves”, Mex J Biotechnol. 2024;9(4):14-26. doi:10.29267/mxjb.2024.9.4.14.
2. H. Salem, T. Smith, “Feeding strategies to increase small ruminant production in dry environments”, Small Rumin Res. 2008;77(2-3):174-194. doi:10.1016/j.smallrumres.2008.03.008.

3. S. A. M. Dias, H. P. B. Nunes, C. F. M. Vouzela, J. S. Madruga, A. E. S. Borba, “Influence of the season on the nutritive value and gas production of Opuntia ficus-indica and *Agave americana* L. in ruminant feed”. Animals. 2023;13(6):1008. doi:10.3390/ani13061008.
4. L. Ortíz-Torres, M. Galván-Valencia, L. Delgadillo-Ruiz, J. Huerta-García, F. Cabral-Arellano, R. Bañuelos-Valenzuela, *et al*. Extracción y obtención de fracciones de saponinas a partir de hojas de los *Agaves salmiana* y *tequilana* weber de Zacatecas. XIII simposium-taller nacional y VI internacional “Producción y aprovechamiento de nopal y maguey”. Escobedo, Nuevo León. 2014: 170-182.
5. García, “Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen”, serie Libros Num. 6, 1998, Instituto de Geografía, UNAM.
6. Jiménez-Muñoz, F. Prieto-García, J. Prieto-Méndez, O. A. Acevedo-Sandoval, R. Rodríguez-Laguna. Caracterización fisicoquímica de cuatro especies de agaves con potencial en la obtención de pulpa de celulosa para la elaboración de papel. DYNA 2016; 83(197): 233-243.
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2023: Climate-smart agriculture. Rome: FAO; 2023.
8. Torres. Producción y calidad de biomasa de cuatro árboles forrajeros nativos del semiárido mexicano en dos sistemas de manejo. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. 2013.
9. S. González. Valor nutricional de dos Especies de Maguey, *Agave salmiana* y *Agave atrovirens* karw, forrajeras utilizadas en las zonas Áridas del Norte de México, en relación a sus características Fenológicas [tesis licenciatura]. Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN); 1994.
10. Instituto de Planeación, Estadística y Geografía del Estado de Guanajuato (IPLANEG), “*Plan Municipal de Desarrollo 2013–2040 para el municipio de Irapuato, Guanajuato*”, Gobierno del Estado de Guanajuato, 2013. Obtenido de: https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/seieg/wp-content/uploads/2022/05/PMD_Irapuato_2013_2040_1448983993.pdf.
11. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “*Anuario estadístico y geográfico del estado de Guanajuato”*, 2023.
12. C. Angeles-Hernandez, E. J. Flores-Santiago, E. Cardoso-Gutiérrez, S.S Valencia-Salazar, O. E del Razo-Rodríguez, J. C. Ku-Vera, *et al., “*The use of mesquite pods (Prosopis spp.) as an alternative to improve the productive performance and methane mitigation in small ruminants: A meta-analysis”. Fermentation. 2024;10(12):625. doi:10.3390/fermentation10120625.
13. Delgado, “Valor nutricional y usos tradicionales de las especies arbóreas del municipio de Nocupétaro, Michoacán”, [Tesis de licenciatura], Facultad de Medicina veterinaria y zootecnia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, 2007.
14. Montañez-Soto, J. Venegas-González, M. Vivar-Vera, E. Ramos-Ramírez “Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber Azul”, Bio, 2011; 23, 3, pp. 199-206.
15. J. A. Jiménez-Torres, C. B. Peña-Valdivia, B. Arroyo, D. Padilla-Chacón, R. García, “Biochemical and physiological time-of-day variations in early-development phase of Agave mapisaga and Agave salmiana. Funct Plant Biol. 2024;51. doi:10.1071/FP23244.
16. J. C. García-López, H. M. Durán-García, J. A. De-Nova, G. Álvarez-Fuentes, J. M. Pinos-Rodríguez, H. A. Lee-Rangel, S. López-Aguirre, D. Ruiz-Tavares, J. A. Rendón Huerta, J. G. Vicente-Martínez, M. Salinas-Rodríguez, “Producción y contenido nutrimental de vainas de tres variantes de mezquite (prosopis laevigata) en el Altiplano Potosino, méxico, Agrociencia, 53. 2019, pp. 821-831.
17. J. M. Pinos-Rodríguez, M. Zamudio, S. S. González, G. D. Mendoza, R. Bárcena, A. Hernández, “Effects of Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck silage as forage on ruminal fermentation and growth in goats”, Anim Feed Sci Technol. 2009;148(1):1-11. doi:10.1016/j.anifeedsci.2008.02.002.
18. J. B. Russell, J. D. O'Connor, D. G. Fox, P. J. Van Soest, C. J. Sniffen, “A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets”, J Anim Sci. 1992;70(11):3551-3561. doi:10.2527/1992.70113551x.
19. J. Montañez-Soto, J. Venegas-González, M. Vivar-Vera, E. Ramos-Ramírez. Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber Azul. Bio, 2011; 23, 3, pp. 199-206.

20. J. M. Pinos-Rodríguez, S. González-Muñoz, B. Badillo, J. C. García-López, J. R. Aguirre-Rivera, S. Infante, “Chemical composition and ruminal in vitro degradation of fresh and ensiled *Agave salmiana*”, J Appl Anim Res. 2008;33(1):45-48.
21. J. M. Wilkinson, M. Rinne, “Highlights of progress in silage conservation and future perspectives”, Grass Forage Sci. 2018;73(1):40-52.
22. A. Gómez, “Caracterización química, degradabilidad e indicadores de la fermentación ruminal *in vitro* de la hoja de mezquite (*Prosopis leavigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) durante dos épocas del año, para su posible uso como alternativa de suplementación de caprinos en agostaderos semiáridos”, Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales. Junio 2013.
23. Jr. Kung, R. D. Shaver, R. J. Grant, R. J. Schmidt, “Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages”, J Dairy Sci. 2018;101(5):4020-4033. doi:10.3168/jds.2017-13909.
24. L. Dunière, J. Sindou, F. Chaucheyras-Durand, I. Chevallier, D. Thévenot-Sergentet, “Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms”, Anim Feed Sci Technol. 2013;182(1-4):1-15.
25. A Mata-E, M. G. Torres-C, G. Hernández-I, M. A. Cobos-P, G. Rodríguez-S, A. Luevano-L, D. R. Guzmán-G, M. M. Gámez-A. Degradability *in vitro* of *Agave mapisaga*, *Agave salmiana* var. salmiana and *Agave salmiana* var. ferox. Rev. Chap. Ser. Zon. Arid., 2011; 10: 123-129.
26. M. Cerrillo, O. López y A. Juárez. Composición química y producción de gas *in vitro* de cactáceas, arbustivas y arbóreas presentes en la dieta de caprinos en pastoreo. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UJED, 2010, Durango, México.
27. M. I. García-Vieyra, J. J. Vargas-Radillo, R. Rodríguez-Macías, R. Rodríguez-Herrera, “Nutritional potential and carbohydrate composition of agave species used as livestock feed in arid regions”, Plants. 2022;11(9):1197.
28. M. G. Armijo-Nájera, A. Moreno-Reséndez, E. Blanco-Contreras, V. J. Borroel-García, J. L. Reyes-Carrillo, “Vaina de mezquite (Prosopis spp.) alimento para el ganado caprino en el semidesierto”, Rev. Mex. Cienc. Agric., 2019: Vol. 10, 1, pp. 113-122.
29. M. S. Awawdeh, W. M. Hananeh, A. Y. Abdullah. Histopathological effects of alternative feedstuffs (sesame hulls and *Prosopis juliflira*) on ruminal wall in black goat kids in Jordan. J. Appl. Animal Res., Vol. 46, 1, 2018, pp. 130-133.
30. N.A. Mancilla-Margalli, M. G. López, “Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from Agave and Dasylirion species”, J Agric Food Chem. 2006;54(20):7832-7839. doi:10.1021/jf060354v.
31. M. Pasiecznik, P. Felker, P. J. C. Harris, L. N Harsh, G. Cruz, J. C. Tewari, *et al*., “The *Prosopis juliflora–Prosopis pallida* complex: A monograph”, Coventry: HDRA; 2001.
32. D. Montañez-Valdez, J. A. Reyes-Gutiérrez, A. Ley-de Coss, R. Vicente-Pérez, A. Gómez-Márquez, C. E. Guerra-Medina, “Composición química y degradación ruminal de la vaina de mezquite (*Prosopis spp*.) a diferente estado de madurez”, Ecosis. Recur. Agropec., 2021: Num. Especial II, pp. 1-8.
33. S. Nobel, “Physicochemical and environmental plant physiology”, 4th ed. Burlington: Academic Press; 2010.
34. P. J. Partida, V. D. Braña, S. H. Jiménez, R. F. Ríos, G. Buendía, “Producción de carne ovina”, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Libro técnico No. 5. 2013.
35. P. J. Van Soest, “Nutritional ecology of the ruminant”, 2nd ed. Ithaca (NY): Cornell University Press; 1994.
36. P. McDonald, A. R. Henderson, S. J. E. Heron, J. M. Wilkinson, “The biochemistry of silage”, 3rd ed. Marlow: Chalcombe Publications; 2018.
37. R, Buzo, Ávila, F. O. Bravo, 1972. “Efecto de la sustitución progresiva de sorgo por vainas de mezquite en la alimentación de ovinos”, Técnica Pecuaria en México: 1972, Vol. 20, pp. 23-27
38. E. Muck, E. M. G. Nadeau, T. A. McAllister, F. E. Contreras-Govea, M. C. Santos, L. Jr. Kung, “Silage review: Recent advances and future uses of silage additives”, J Dairy Sci. 2018;101(5): 3980-4000. doi:10.3168/jds.2017-13839.
39. K. Sawal, R. Ratan, S. B. S. Yadav, "Mesquite (*Prosopis juliflora*) pods as a feed resource for livestock”, Asian-Australas J Anim Sci. 2004;17(5):719-725.

40. R. Martínez, “Evaluación de hojas y vainas de arbustivas consumidas por las cabras mediante la técnica in vitro de producción de gases”, Centro de Investigación en ciencias agropecuarias (CICA), Universidad Autónoma del Estado de México, 2006.
41. R. Ramírez, “Nutricion de caprinos en pastoreo. ed. Trillas, 2008, UANL. México.
42. L. Alcantar-Morales, A. Ramírez-Ortiz, D. Gallardo-Martínez, E. Favela-Torres, A. E. Cruz-Guerrero, “Kinetics and microbiology of pulp silage from decorticated *Agave salmiana* leaves”, Mexican Journal of Biotechnology, 2024; 9(4), 14–26. https://doi.org/10.29267/mxjb.2024.9.4.14
43. Ritsema, S. Smeekens, “Fructans: Beneficial for plants and humans”, Curr Opin Plant Biol. 2003;6(3):223-230. doi:10.1016/S1369-5266(03)00034-7.
44. A. Gómez. Digestibilidad *in vitro* de dos variedades de maguey (*Agave salmiana* y *Agave americana*) [tesis de licenciatura]. Saltillo, Coahuila: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; 2003.

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEGRADATIVO DE PLÁSTICOS MEDIANTE LA ACCIÓN DE EXTRACTOS ENZIMÁTICOS DE *Rossellomorea Vietnamensis*

Yoselin Karely Rodriguez Reyes[1], María Teresa Sumaya Martínez[1], Leticia Casas Godoy[2], María Marcela Robles Machuca[1*]

[1]Universidad Autónoma de Nayarit. Secretaría de Investigación y Posgrado. [2]SECIHTI–Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.
*marcela.robles@uan.edu.mx

RESUMEN

La alta demanda de plásticos en el mundo, la indebida administración de estos y su uso desmedido han provocado un severo problema de contaminación en el ambiente, debido a que, los plásticos con el paso del tiempo se fragmentan a microplásticos afectando a suelos, agua, aire y organismos vivos. La biodegradación es una alternativa temprana y sustentable, ya que microorganismos (MO) como las bacterias pueden degradar los polímeros mediante enzimas extracelulares. El presente estudio evaluó el crecimiento de *Rossellomorea vietnamensis* en presencia de plásticos convencionales y se determinó el potencial degradativo del extracto enzimático en diferentes tipos de polímeros en fermentación líquida. Se realizó un cribado en distintos MO en un medio solido mineral (g L^{-1}: K_2HPO_4 1, KH_2PO_4 0.2, $(NH_4)_2$ SO_4 1, $MgSO_4$ $7H_2O$ 0.5, NaCl 1, $FeSO_4$ $7H_2O$ 0.01, $CaCl_2$ H_2O 0.002, $MnSO_4$ $7H_2O$ 0.001, $CuSO_4$ $5H_2O$ 0.001 y $ZnSO_4$ $7H_2O$ 0.001, pH 7.0) enriquecido con diferentes plásticos como Tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE) para evaluar su nivel de crecimiento. Los polímeros positivos al cribado, se les realizó un ensayo de degradación enzimática en medio mínimo líquido (g L^{-1}: $MnSO_4$ H_2O 0.001, KCl 0.5, $NaNO_3$ 3, $MgSO_4$ $7H_2O$ 0.5, K_2HPO_4 1, $FeSO_4$ $7H_2O$ 0.01, $(NH_4)_2SO_4$ 1, triptona 20, dextrosa 5, $CuSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.0001 y extracto de levadura 1) en presencia del plástico previamente radiados con luz UV, con toma de muestra cada 24 h hasta las 72 h. El nivel de crecimiento se catalogó en un incremento del 0-3. La pérdida de peso se realizó mediante la diferencia del peso inicial y final al ensayo de degradación del plástico. Los cambios conformacionales se analizaron mediante espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y se determinó el cambio en los grupos funcionales del plástico. El resultado del cribado de seis cepas mostró a *R. vietnamensis* con la mayor capacidad de crecimiento en PVC y PS, seguido de un crecimiento medio en PET y un bajo o nulo crecimiento en LDPE, PP y HDPE. La mayor actividad enzimática de *R. vietnamensis* en PVC fue de 30.68 U mg^{-1} a las 72 h seguido de PS a las 24 h con 27.21 U mg^{-1}. Mientras que, en PVC la pérdida de peso fue del 1.94%. El análisis de los cambios conformacionales mostró que en PVC (índice de carbonilo (IC) = 3.0; índice hidroxilo (IH) = 0.17) y PS (IC = 1.26; IH = 0.15) el incremento del IC fue superior al del IH, lo que sugiere que la degradación estuvo asociada a procesos de oxidación que favorecen la formación de grupos carbonílicos. Este estudio evidenció que el extracto enzimático de *R. vietnamensis* es capaz secretar enzimas relacionadas con la degradación oxidativa de los plásticos PVC y PS, lo cual contribuye a nuevas líneas de investigación para evaluar MO aún no asociados a la degradación de plásticos.

INTRODUCCIÓN

Un plástico es un polímero sintético formado por la unión repetitiva de monómeros que se unen mediante enlaces químicos, formando una estructura que puede ser lineal, ramificada o reticulada, dependiendo del tipo de polímero [1]. Los plásticos se clasificación según su composición química: tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y poliuretano (PUR). Los plásticos son materiales sintéticos ampliamente utilizados debido a su bajo costo, durabilidad y accesibilidad, sin embargo, estas características favorecen su acumulación en el ambiente. Estos

pueden tardar en degradarse hasta 500 años, provocando la generación de microplásticos, que son partículas solidad de 1 µm a 5 mm, las cuales se acumulan en el ambiente [2].

En los últimos años, diversos investigadores han explorado la utilización de microorganismos en la biodegradación de los residuos plásticos como una alternativa sostenible para mitigar el impacto ambiental. La biodegradación microbiana, es un proceso biológico natural en el cual los microorganismos mineralizan materiales complejos en sustancias más simples como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), agua (H_2O) y otros compuestos orgánicos, a través de la acción enzimática [3].

Las enzimas forman parte de los microorganismos y ayudan a metabolizar los nutrientes. Se ha identificado que las enzimas extracelulares (oxidasas e hidrolasas) tienen la capacidad de digerir los polímeros insolubles y los metabolitos resultantes se transportan dentro de la célula para utilizarse como nutrientes [4]. Esta degradación polimérica mediada por microorganismos se basa en una primera adhesión al plástico y subsecuente secreción de enzimas extracelulares que utilizan al plástico como sustrato causando despolimerización a fragmentos más pequeños en forma de oligómeros, dímeros y monómeros, que son utilizados por los microrganismos como fuente de carbono [5]. Algunas de las enzimas hidrolasas asociadas a la degradación de polímeros son las poliesterasas. Estas enzimas facilitan la degradación del polímero al romper los enlaces químicos desde el exterior al interior [6].

En la degradación de plásticos la pérdida de peso del material plástico es un método cuantitativo que consiste en medir la disminución del peso de una muestra plástica expuesta a condiciones de biodegradación. Esta técnica necesita ser complementada con pruebas condicionales, como Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), esta es una técnica analítica qué permite obtener el espectro de absorción de una muestra al interactuar con radiación infrarroja, esta radiación induce vibraciones moleculares, como el estiramiento y flexión de los enlaces químicos. El FTIR ha sido una herramienta clave para estudiar procesos de biodegradación de plásticos, ya que permite detectar cambios en los grupos funcionales de polímeros tras la exposición a microorganismos degradadores o a condiciones ambientales. En él, se observan los cambios en la banda carbonilo (C=O), que ha dado lugar a un método llamado índice carbonilo (CI). El FTIR detecta los grupos funcionales presentes en distintas bandas. La CI monitorea específicamente la banda de absorción de las especies carbonílicas formadas en los procesos de foto o termo-oxidación en el rango de 1.850-1.650 cm−1, midiendo una relación del pico carbonílico en relación con un pico de referencia. Asimismo, la banda hidroxilo analiza el estiramiento del grupo hidroxilo (-OH), el cual se ubica entre 3.200-3.600 cm-1, [7].

TEORÍA

Como una alternativa emergente la biodegradación de plásticos mediante microorganismos y sus enzimas ha surgido como una posibilidad prometedora para degradación de los residuos plásticos. Durante este proceso, los microorganismos se adhieren y colonizan la superficie del polímero, además de que secretan enzimas extracelulares que favorecen la fragmentación de los plásticos. Los productos resultantes pueden ser asimilados por las células microbianas como fuente de carbono y liberar CO_2 [8]. Se han asociado microorganismos como bacterias y hongos con potencial enzimático para la degradación de materiales plásticos, generando cambios físicos y químicos, perecientes a las primeras etapas de biodegradación.

Las hidrolasas son uno de los principales grupos de enzimas involucradas en la degradación de polímeros, dentro de este grupo se encuentras las poliesterasas. Estas enzimas son capaces de hidrolizar los polímeros debido que son solubles en agua. Hidrolizan los enlaces susceptibles al ataque enzimático y descomponen los polímeros en monómeros más simples, por lo que permite a los microorganismos asimilar a los monómeros como principal fuente de carbono y posteriormente ser metabolizados [9].

La capacidad de biodegradación de los polímeros sintéticos depende de factores como su estructura química, peso molecular, hidrofobicidad y grado de cristalinidad. Materiales como PET, HDPE y LDPE poseen un alto grado de cristalinidad, lo que dificulta el acceso de los microorganismos y sus enzimas a las cadenas poliméricas, reduciendo su susceptibilidad a la degradación biológica [8].

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico

Se utilizo la cepa bacteriana *R. vietnamensis* la cual fue aislada de un vertedero sobre el manglar en el municipio de San Blas, Nayarit. La cepa fue reactivada en agar nutritivo (g/L): 23. La cepa fue incubada a 30°C durante 24 h.

Cribado de la selección de microplásticos

La cepa se inoculo en un medio mineral (g L^{-1}): K_2HPO_4 1, KH_2PO_4 0.2, $(NH_4)_2$ SO_4 1, $MgSO_4$ $7H_2O$ 0.5, NaCl 1, $FeSO_4$ $7H_2O$ 0.01, $CaCl_2$ H_2O 0.002, $MnSO_4$ $7H_2O$ 0.001, $CuSO_4$ $5H_2O$ 0.001 y $ZnSO_4$ $7H_2O$ 0.001, pH 7.0, enriquecido con 0.1% de microplásticos y 1% de Tween 80. Los microplásticos utilizados fueron tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE). Las cajas fueron incubadas a 30°C durante 21 días. Posteriormente a la incubación, la revelación del halo de aclaramiento alrededor de la colonia, se utilizó azul brillante de Coomassie 0.1% p/v.

Producción de enzimas extracelulares

Para la producción de enzimas poliesterasas, se empleó aceite mineral como inductor enzimático. Los microorganismos se cultivaron en un medio mínimo líquido (g L^{-1}): $MnSO_4$ H_2O 0.001, KCl 0.5, $NaNO_3$ 3, $MgSO_4$ $7H_2O$ 0.5, K_2HPO_4 1, $FeSO_4$ $7H_2O$ 0.01, $(NH_4)_2SO_4$ 1, triptona 20, dextrosa 5, $CuSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.0001 y extracto de levadura 1. Posteriormente, se adicionó el aceite mineral. El medio fue inoculado con el cultivo bacteriano hasta alcanzar una densidad óptica de 0.6 a 600nm (OD_{600}). Se incubaron a 30°C y 150 rpm para favorecer la producción enzimática.

Ensayo de biodegradación de plástico con extracto enzimático

Para la obtención del extracto enzimático, las muestras en fermentación sumergida se centrifugaron a 5,000 rpm por 20 min. El sobrenadante se utilizó como extracto enzimático. Para el ensayo se utilizó una solución amortiguadora de fosfatos PBS compuesta por (100mM): NaH_2PO_4 /$Na_2PO_4 \cdot 7H_2O$, NaCl, pH 7.2, se adiciono el extracto enzimático de *R. vietnamensis,* en presencia del plástico previamente radiado con luz ultravioleta (UV), registrado previamente su peso inicial. Las muestras se incubaron bajo las condiciones establecidas y se realizaron tomas de muestra cada 24 h para su posterior análisis.

Medición de la actividad enzimática

Para determinar la actividad de poliesterasas, se agregó una alícuota del sobrenadante a una microplaca de 96 pocillos y se adicionó PBS y p-nitrofenil butirato (p-NPB) como sustrato. La reacción se monitoreo mediante la medición de la absorbancia a 450 nm utilizando un espectrofotómetro. La actividad enzimática se expresó en unidades por mililitro (U mL^{-1}), donde una unidad (U) como la cantidad de poliesterasas capaz de hidrolizar 1 µmol de p-nitrofenil por minuto bajo las condiciones del ensayo.

Cuantificación de proteínas por Bradford

La concentración de proteína del extracto enzimático se determinó mediante el método de Bradford. Se utilizó 5 µL del extracto enzimático y 250 µL de reactivo de Bradford, se incubo en oscuridad durante 10 min. La absorbancia se midió a 550 nm mediante espectrofotometría.

Pérdida de peso del plástico

La pérdida de peso del polímero se determinó mediante la diferencia entre el peso inicial y el peso final de la muestra. Antes del inicio del ensayo, se registró el peso inicial del plástico. Al finalizar el

periodo de incubación, las muestras fueron desinfectadas con etanol al 70% y lavadas con SDS al 2% para eliminar residuos adheridos a la superficie. Posteriormente, las muestras se secaron en un desecador hasta peso constate por al menos 48 h y se registró el peso final. El porcentaje de pérdida de peso se calculó utilizando la Ecuación 1.

$$PP\% = \frac{\mathbf{PI} - \mathbf{PF}}{\mathbf{PI}} \, \boldsymbol{x} \, \mathbf{100}$$

Ecuación 1. Pérdida de peso. PI es peso inicial del plástico (g), PF es peso de plástico después de catálisis en medio líquido y el lavado de este (g.)

Espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los cambios conformacionales generados en el plástico como consecuencia de la catálisis enzimática se evaluaron mediante FTIR. Los análisis se realizaron en un espectrofotómetro FTIR Tecnologia Cary 630. Cada muestra se analizó utilizando 74 escaneos a una resolución de 2 cm^{-1}, en un rango de 4000 a 650 cm^{-1}. Los espectros obtenidos se emplearon para identificar modificaciones en los grupos funcionales de los polímeros asociados al proceso de degradación enzimática.

RESULTADOS

Se evaluó la capacidad de crecer en presencia de microplásticos como única fuente de carbono durante un periodo de tres semanas. La evaluación se realizó de manera cualitativa por medio de la presencia de un halo de aclaramiento alrededor de la zona de crecimiento de la colonia, los cuales se consideraron indicativos de la degradación del polímero. Se utilizó una escala de puntuación de 0 a 3, donde 3 correspondió a la formación de halo con aclaramiento completo, 2 a un halo con aclaramiento parcial, 1 a un ligero aclaramiento y 0 ausencia de crecimiento. Tomando el puntaje 3 como positivo al halo de aclaramiento (Figura 5) y, por lo tanto, con potencial degradador de microplásticos.

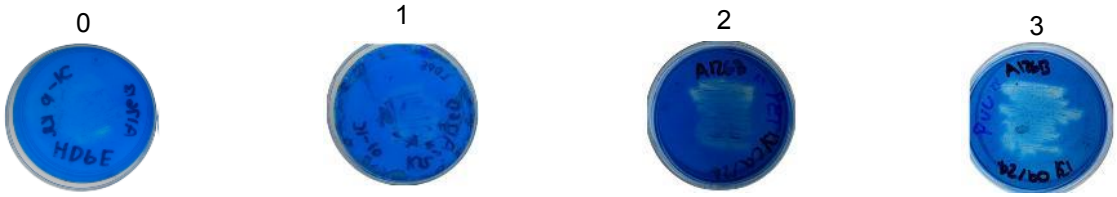


Figura 5. Criterio visual de los halos de aclaramiento en presencia de microplásticos

R. vietnamensis presentó diferentes niveles de aclaramiento dependiendo del tipo de microplástico evaluado. La mayor actividad se observó en PVC y PS, con una puntuación de 3, correspondiente a la formación de halo con aclaramiento completo. En PET se registró una puntuación de 2, indicando una formación del halo con aclaramiento parcial. Por otro lado, en LDPE se observó un pequeño aclaramiento (puntuación 1), mientras que en PP y HDPE no se detectó crecimiento ni aclaramiento, obteniendo una puntuación de 0.

Con base en estos resultados, PVC y PS fueron seleccionadas para la evaluación de la actividad poliesterasas del extracto enzimático *R. vietnamensis*. Como se muestra en la Tabla 3, la mayor actividad especifica se registró en PVC, alcanzando 30.68 U mg^{-1} a las 72 h de incubación. En PS la actividad específica máxima fue de 27.2 U mg^{-1} a las 24 h. Esto sugiere que el extracto enzimático de PVC presento una mayor capacidad de hidrolisis bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 3. Evaluación de la actividad enzimática poliesterasas del extracto enzimático de *R. vietnamensis.*

Rossellomorea vietnamensis						
Plástico	**Volumen (mL)**	**Actividad (U mL^{-1})**	**U totales**	**Proteína (mg mL^{-1})**	**Actividad específica (U mg^{-1})**	**Tiempo optimo (h)**
PVC	30	0.23	7.09	0.007	30.68	72
PS	**30**	**0.11**	**3.40**	**0.004**	**27.20**	**24**

En la Figura 6 se muestra la actividad catalítica del extracto enzimático producido por *R. vietnamensis* sobre PVC y PS. En PVC la actividad presentó un incremento progresivo durante la evaluación, alcanzando su valor más alto a las 72 h. En comparación, en PS la actividad aumentó durante las primeras 24 h de incubación, alcanzado su valor máximo, posteriormente disminuyo de forma gradual. Ambos sustratos mostraron actividades similares.

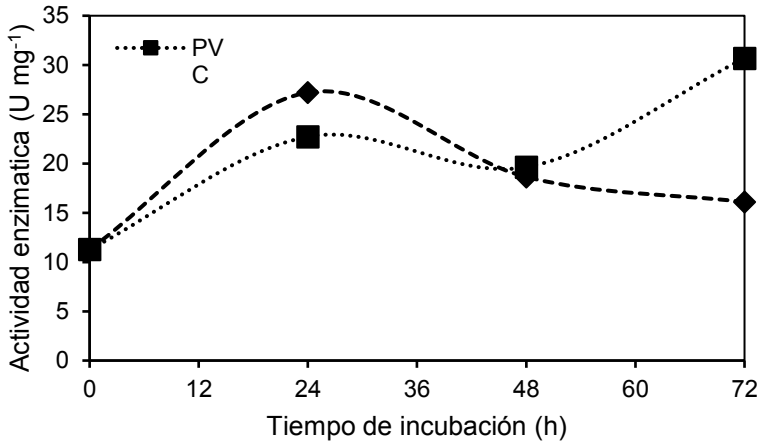


Figura 6. Gráfica de la actividad enzimática del extracto de la cepa R. vietnamensis con los plásticos PVC y PS.

En la Tabla 4 se presentaron los porcentajes de pérdida de peso de los plásticos después de estar en contacto con el extracto enzimático de *R. vietnamensis.* El PVC mostró la mayor pérdida de peso con un valor de 1.94% a las 72 h de incubación. Por otro lado, el PS presentó un valor de -10.66% lo que indica un incremento en el peso final respecto al inicial. Esto se puede atribuir a la adherencia de residuos sobre la superficie del polímero. Debido a que la pérdida de peso por sí sola no es una evidencia concluyente de biodegradación, especialmente en polímeros recalcitrantes como el PS, los resultados fueron complementados mediante espectroscopía FTIR.

Tabla 4. Pérdida de peso del plástico durante la catálisis en medio líquido.

Rossellomorea vietnamensis	
Plástico	**Pérdida de peso (%)**
PVC	1,94
PS	-10,66

El análisis de FTIR es una técnica efectiva para la determinación de grupos funcionales específicos y diferentes tipos de enlaces que se encuentran en la muestra. La aparición o variación de grupos carbonilo e hidroxilo suele asociarse con procesos de oxidación del polímero, los cuales pueden incrementar su susceptibilidad al ataque microbiano.

En la Figura 7a, los espectros FTIR del PVC mostraron la conservación de las bandas características del polímero en todos los tratamientos evaluados. Se observaron señales en la región correspondiente a grupos carbonilo (≈1720 cm^{-1}), así como ligeras variaciones en la región atribuida a grupos hidroxilo (≈3400 cm^{-1}). En comparación con el control sin tratamiento (PVC), las muestras sometidas a radiación UV (PVC UV), el blanco abiótico (PVC B) y el tratamiento con *R. vietnamensis* (PVC 126B) presentaron modificaciones en la intensidad relativa de estas bandas, sugiriendo cambios superficiales asociados a procesos de oxidación. Sin embargo, las bandas características del polímero permanecieron presentes, indicando la conservación de su estructura general.

Los espectros FTIR del PS (Figura 7b) también mostraron la conservación de las bandas características del polímero en todos los tratamientos. Se observaron ligeras variaciones en la intensidad de las señales localizadas en las regiones asociadas a grupos carbonilo (1700–1740 cm^{-1}) e hidroxilo (3200–3600 cm^{-1}) entre el control, el tratamiento UV, el blanco abiótico y el tratamiento con *R. vietnamensis*. Estas diferencias sugieren posibles modificaciones superficiales inducidas por la radiación UV y *R. vietnamensis*. Sin embargo, la permanencia de las bandas características del poliestireno indica que la estructura principal del polímero se mantuvo conservada.

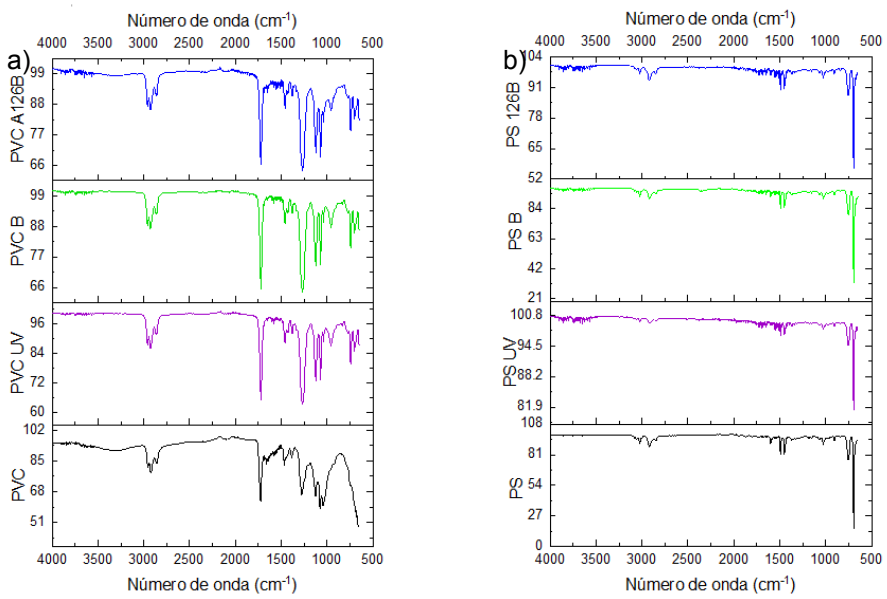


Figura 7. Espectro FTIR de PVC y PS. Condición: sin tratamiento (color negro), tratado con UV (color morado), blanco sin extracto enzimático (color verde) y catálisis en medio líquido (color azul).

CONCLUSIONES

R. vietnamensis mostró capacidad de crecer en presencia de diferentes tipos de plásticos como única fuente de carbono, presentando la mayor formación de halos de aclaramiento en PVC y PS, lo que sugiere un mayor potencial de interacción con estos polímeros en comparación con los demás materiales evaluados.

En la evaluación de pérdida de peso mostró una reducción en PVC posterior al tratamiento enzimático; mientras que, en PS no se observó una disminución cuantificable. Estos resultados indican que la pérdida de peso por sí sola no es suficiente para evidenciar cambios en los polímeros. Por ello, se utilizó el FTIR, en la que se mostraron modificaciones en las regiones asociados a los grupos carbonilos e hidroxilo en PVC y en PS, correspondientes a cambios en etapas iniciales de transformación del material.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el extracto enzimático de *R. vietnamensis* posee potencial para interactuar con plásticos, particularmente PVC y PS. Sin embargo, los cambios corresponden principalmente a etapas iniciales de biodegradación, por lo que requieren periodos de

incubación más prolongados y estudios complementarios para determinar con mayor precisión el alcance de la degradación de estos plásticos.

A la fecha de este estudio, no existen reportes previos en la literatura que relacionen a *R. vietnamensis* con la capacidad de degradar de polímeros. Por ello, los resultados obtenidos en este estudio representan una contribución inicial al conocimiento del potencial biotecnológico de este microorganismo y abren nuevas oportunidades de investigación en la biodegradación de plásticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Weerasinghe, M.A.S.N., et al., *Educational series: turning monomers into crosslinked polymer networks.* Polymer Chemistry, 2023. 14(39): p. 4503-4514.
2. Yang, X.G., et al., *Plastic biodegradation by in vitro environmental microorganisms and in vivo gut microorganisms of insects.* Front Microbiol, 2022. 13: p. 1001750.
3. Salamanca, K.A.A., *Biotransformación de polímeros sintéticos por medio de bacterias*. 2022, Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD.
4. Madigan, M.T., J.M. Martinko, and J. Parker, *Brock Biology of Microorganisms*. Vol. 10. 2003, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
5. Ciuffi, B., E. Fratini, and L. Rosi, *Plastic pretreatment: The key for efficient enzymatic and biodegradation processes.* Polymer Degradation and Stability, 2024. 222.
6. Sun, S., *Enzyme-Embedded Biodegradable Plastic for Sustainable Applications: Advances, Challenges, and Perspectives.* ACS Appl Bio Mater, 2025. 8(3): p. 1785-1796.
7. Almond, J., et al., *Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy.* e-Polymers, 2020. 20(1): p. 369-381.
8. Mohanan, N., et al., *Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics.* Front Microbiol, 2020. 11: p. 580709.
9. Khairul Anuar, N.F.S., et al., *An Overview into Polyethylene Terephthalate (PET) Hydrolases and Efforts in Tailoring Enzymes for Improved Plastic Degradation.* Int J Mol Sci, 2022. 23(20).

EVALUACIÓN DE COMPUESTOS BIOACTIVOS CON CAPACIDAD ANTIOXIDANTES EN PLANTAS DE *Justicia Secunda Vahl* Y *Stevia Rebaudiana Bertoni*

Edwin Luna-Castrejón [1]; Nelly Cruz-Cansino [2]; Esther Ramírez-Moreno [2]; Elsa Ventura-Zapata [1]; Javier Villanueva-Sánchez [1]

[1] Centro Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional.
[2] Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Hidalgo.
elunac2500@alumno.ipn.mx

RESUMEN

En la actualidad, la vida acelerada, la contaminación del ambiente, la mala alimentación ha tenido un gran impacto negativo al aumentar el estrés oxidativo, provocando un crecimiento alarmante sobre las enfermedades no transmisibles. Una opción para combatir estas enfermedades, es el uso de fármacos sintéticos, pero el uso continuo y alargado trae efectos secundarios por lo que es recomendable el consumo de bebidas con antioxidantes a través de plantas que se cultivan actualmente por la micropropagación. La planta *Justicia secunda* Vahl, originaria de Sudamérica, utilizada tradicionalmente en diversas culturas por sus propiedades medicinales, sus hojas, tallos y raíces contienen flavonoides y compuestos fenólicos con fuerte actividad antioxidante, y un posible efecto antidiabético[3]. Por otro lado, *Stevia rebaudiana* Bertoni, es reconocida por su intenso poder edulcorante gracias a los glucósidos de esteviol, compuestos que además de ser bajos en calorías, presentan efectos antihiperglucémicos, insulino trópicos y antioxidantes, convirtiéndola en una alternativa segura y eficaz[2].

El objetivo del presente trabajo fue evaluar los compuestos antioxidantes y su actividad antioxidante de dos plantas micropropagadas utilizadas comúnmente como medicinales.

Las plantas de *Justicia secunda* Vahl y *Stevia rebaudiana* Bertoni fueron recolectadas de forma manual de plantas propagadas *in vitro* y crecidas en maceta con una mezcla de los sustratos agrolita, fibra de coco y peat moss en proporción 1:1, en donde crecieron durante 2 meses en el Laboratorio Ecológico de Hidroponía del CEPROBI, durante la etapa del crecimiento vegetativo y antes de su flora se obtuvieron las hojas, donde una vez lavadas se llevaron a deshidratar (secado natural). Una vez deshidratadas fueron homogeneizadas (0.5 µm) y almacenadas para su análisis. Posteriormente a las muestras se les realizó una extracción de antioxidantes con solventes orgánicos (agua, alcohol y acetona), se les determinó la capacidad y cuantificación de compuestos antioxidantes mediante el análisis de ABTS, DPPH, compuestos fenólicos totales y flavonoides. Los resultados fueron expresados en 100 g de base seca (bs).

La planta Justicia secunda Vahl presentó los siguientes valores (ABTS 347.59 ± 4.67, DPPH 1459.90 ± 13.2 µmol ET/100 g bs) muy probablemente por los compuestos encontrados como compuestos fenólicos totales (785.1 ± 1.2) y flavonoides (2803.7 ± 27.2 mg QE/100 g bs). Mientras que la planta de Stevia presentó una actividad antioxidante alta (ABTS 725.82 ± 4.67, DPPH 29453.60 ± 377.1 µmol ET/100 g bs) muy probablemente debido a los compuestos fenólicos totales (7433.7 ± 20.7) y flavonoides (14856 ± 36.3 mg QE/100 g bs).

De acuerdo con lo encontrado las plantas de estudio tuvieron una actividad antioxidante alta por lo que pudieran ser utilizadas como una excelente alternativa en productos funcionales para el consumo humano con bajo contenido de azúcares.

INTRODUCCIÓN

México es una de los países con mayor diversidad de plantas medicinales siendo utilizadas desde hace tiempo, gran parte de la población depende de la medicina herbolaria como alternativa terapéutica, especialmente en comunidades rurales y regiones con acceso limitado a servicios de salud, sin embargo, hay un alto porcentaje de especies que carecen de estudios científicos que respalden sus propiedades biológicas[9]. Entre las especies medicinales destacan Insulina y Stevia (*Justicia secunda Vahl* y *Stevia rebaudiana Bertoni*), reconocidas por su contenido de metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antidiabéticas. Factores como la temperatura, disponibilidad de nutrientes, salinidad, humedad, iluminación y estrés ambiental modifican la producción de metabolitos secundarios. Por esta razón, las condiciones de cultivo representan un aspecto clave para garantizar la calidad fitoquímica y terapéutica de las plantas medicinales[8,21]. Por otra parte, el estudio de la capacidad antioxidante total mediante métodos *in vitro* en el análisis de extractos vegetales, permite cuantificar el potencial antioxidante de los compuestos presentes en las plantas. Estas metodologías son utilizadas para evaluar la capacidad de neutralizar radicales libres y estimar el posible efecto protector de los antioxidantes naturales frente al estrés oxidativo[6]. El cultivo hidropónico ha demostrado múltiples ventajas, sin embargo, existen pocos estudios enfocados en el cultivo hidropónico de plantas medicinales y en la evaluación de cómo este sistema influye en la producción de metabolitos secundarios y en la capacidad antioxidante de especies como *Justicia secunda Vahl* y *Stevia rebaudiana Bertoni*. Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones que permitan conocer el potencial de los sistemas hidropónicos para mejorar la calidad fitoquímica de estas plantas[17].

TEORÍA

Plantas medicinales

Son especies que producen una gran diversidad de compuestos químicos (principios activos) y una extensa variedad de metabolitos secundarios, en sus raíces, hojas, tallos o flores[9]. Empleadas para aliviar, curar o mantener la salud física, emocional, mental o espiritual, mejorar la calidad de vida, e incluso procurar gran longevidad[25]. Las plantas curativas son la base de la medicina tradicional y se han utilizado en todo el mundo desde hace milenios[38].

En México, están registradas 3 000 especies con atributos medicinales, de las 4 500 que existen[9], sin embargo, sólo el 5 % cuenta con estudios científicos por lo que muchas se usan, pero se desconoce si en realidad sirven para determinado fin[28]. A pesar de ello, el 80% de la población acude a la medicina ancestral herbolaria[6], sobre todo en zonas rurales donde la falta de servicios de salud impulsa el uso de remedios herbales o como tratamientos alternativos para diversas enfermedades o dolencias [11,28].

Los metabolitos secundarios, son pequeñas moléculas orgánicas no esenciales para el desarrollo de la planta, pero sí fundamentales para la supervivencia, adaptación y defensa contra depredadores y estrés ambiental, ayudan a la atracción de polinizadores[6]. La naturaleza química y la composición de los metabolitos varían entre especies, aproximadamente se han analizado 50 000 moléculas a las que se ha definido su estructura química. Dentro de los principales grupos de metabolitos secundarios se encuentran los compuestos fenólicos (formados por glucósidos simples y anillos de benceno), los terpenos y esteroides (constituidos principalmente por carbono e hidrógeno) y aquéllos que contienen nitrógeno en su molécula. La causa de sus propiedades antioxidantes depende de la cantidad y la disposición de los grupos hidroxilos en las moléculas en cuestión[35].

En la actualidad se ven expuestas a diversos factores biológicos, antropológicos y climáticos como la fragmentación del hábitat causada por el hombre, recolección de forma insostenible; combinación que puede conducir a la extinción de las poblaciones naturales[5]. Algunas especies, en respuesta al aumento del estrés ambiental disminuyen la producción de biomasa y además cambian la composición de su perfil fitoquímico, lo cual puede afectar la calidad e incluso la seguridad de los productos medicinales. Los metabolitos secundarios con actividad antioxidante pueden disminuir su

síntesis hasta en un 50 %. Por lo anterior, es importante considerar optimizar las técnicas de cultivo en condiciones ambientales adecuadas para maximizar la calidad y cantidad de metabolitos secundarios[22].

Plantas medicinales cultivadas en hidroponía

La hidroponía es un método de cultivo en el que las plantas crecen sin tierra, recibiendo los nutrientes esenciales a través de una solución nutritiva disuelta en agua. En este sistema, las raíces pueden estar directamente en el agua o en sustratos inertes (perlita, grava o fibra de coco, etc.), permitiendo un mayor control de los nutrientes. La hidroponía se presenta como una alternativa para producir alimentos frescos y saludables, especialmente ante problemas como el uso de pesticidas o la disminución de la calidad de los alimentos disponibles en el mercado[26].

Los cultivos por hidroponía suponen algunas ventajas: nutrición óptima de la planta, mayor rendimiento y calidad de las cosechas en menor área de cultivo y disminución en la aplicación de pesticidas. La literatura resalta que, la hidroponía ayuda a las plantas a un mayor crecimiento, una mejor respuesta en los parámetros bioquímicos y fisiológicos como el incremento en la concentración de clorofila y en el proceso fotosintético[15]. También en las características morfológicas y en su ciclo de vida con una mayor formación de follaje, flores y frutos en menor tiempo[12]. Algo que caracteriza a esta técnica es el uso eficiente de agua, además, se crea un microclima que mejora el proceso fotosintético, reduciendo la transpiración e incrementando la producción. En este sistema no requiere rotación de cultivos porque no hay problema con el consumo de nutrientes ni desgaste del suelo[18].

Esta situación abre nuevas oportunidades para una investigación más detallada sobre el crecimiento vegetativo, la concentración de metabolitos secundarios que podrían ser influenciados por el uso de soluciones nutritivas y sustratos inorgánicos de estas plantas[10]. Al respecto, la literatura reporta que la acumulación de altos contenidos de nitratos en la solución nutritiva puede aumentar la producción de compuestos fenólicos y sus derivados. En la actualidad, los cultivos hidropónicos se están convirtiendo en sistemas de producción sustentables y altamente eficientes, gracias a diversas tecnologías complementarias como la energía solar, el internet de las cosas e inteligencia artificial que permiten monitorear y controlar las variables de la solución nutritiva las del ambiente y dar seguimiento a los parámetros de crecimiento de las plantas[15,24].

Justicia secunda Vahl

Es una planta perteneciente a la familia *Acanthaceae*, consta de unas 600 especies de hierbas y arbustos nativos de los trópicos y subtrópicos, siendo el género *Justicia* el más grande de la familia[18]. Nombrado en honor al botánico escocés del siglo XVIII James Justice, Sus especies se describen como hierbas perennes erectas o trepadoras o subarbustos[32], reconocidas por su corola bilabiada (flor cuyos pétalos forman un tubo dividido en dos labios uno superior y uno inferior), con un labio posterior generalmente bilobulado (que tiene forma de boca abierta), un labio anterior trilobulado (se divide en tres secciones), dos estambres, una cápsula con cuatro semillas y una porción basal estéril[3].

También conocida como: cascajera, yerba de la sangre, sangre de Cristo, insulina, la hoja de la vida, curatodo, canilla de pollo, sanguinaria, entre otros, haciendo referencia al color rojo del agua cuando se extrae de la planta al hervirla o remojándola[21]. Los arbustos se cultivan comúnmente alrededor de las viviendas y se utilizan como cercas y ornamentales, ya que son fáciles de cultivar y propagar a partir de esquejes de tallo, insertando los tallos de 1 a 2 pulgadas en el suelo, hasta que los habitantes descubrieron sus propiedades medicinales, y posteriormente, las hojas de esta planta se utilizaron para tratar y curar diversas dolencias[14].

La planta *Justicia secunda* Vahl (Figura 1) es un pequeño arbusto o subarbusto perenne y perennifolio con tallos más o menos leñosos, de 0.5 a 1 m de altura, con flores rojas agrupadas en 5 pétalos sobre la corola, rara vez tienen flores solitarias terminales o axilares, las hojas presentan cristales y son pecioladas con un margen foliar generalmente entero[18]. Esta planta es originaria de

las regiones tropicales y templadas de Sudamérica, también florecen en climas húmedos, hoy en día se cultiva en varios países de Asia, América y África[14]



Figura 8. Planta de *Justicia secunda* Vahl obtenida en el Laboratorio Ecológico de Hidroponía del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional

Múltiples estudios farmacológicos y químicos, de los extractos de hojas reveló la presencia de polifenoles como flavonoides, taninos, leucoantocianinas y antocianinas. Los flavonoides fueron la clase más abundante de compuestos fenólicos encontrados[14]. Se ha logrado hallar minerales en mayor proporción son el hierro, selenio, calcio, potasio, magnesio, sodio, manganeso entre otros, los cuales son beneficiosos al destacar su valor nutricional y sus beneficios para la salud[21].

La actividad antidiabética podría atribuirse a la presencia de ácido 2-cafeoiloxi-4-hidroxi-glutárico y los diastereómeros secundarellona B y C, que se demostró *in vitro* que inhiben la α-glucosidasa, también la presencia de compuestos biológicamente activos, incluyendo glucósidos de apigenina (infusión y extracto metanólico), rutina (extracto metanólico), luteolina y sus glucósidos (infusión, acetato de etilo y extractos metanólicos), derivados de lignanos (infusión y el extracto metanólico)[32].

A partir de las hojas recolectadas, lograron identificar, mediante el extracto etéreo: glucósidos fenólicos, saponina, mucílagos, antraquinonas, leucoantocianina, triterpenos, quinonas; del extracto diclorometanoico de las hojas se aislaron auranamida, acetato de aurantiamida y quindolina, esteroles[18]. Fregoso y colaboradores (2025), a partir de hojas detectaron diversos fitoquímicos como: leucoantocianinas y esteroles, demostraron una actividad antioxidante total similar al ácido ascórbico.n.

Stevia rebaudiana Bertoni

Es una planta herbácea perenne perteneciente a la familia *Asteraceae*, originaria de las montañas Amambay, hasta ahora se han reconocido 269 especies del género Stevia, se originó en Paraguay, donde se le conoce como hoja de miel, hoja dulce o hierba dulce. Crece en climas cálidos, húmedos y subtropicales, se encuentra en regiones montañosas bien drenadas o pastizales húmedos. Su distribución natural se expande desde el suroeste de Estados Unidos hasta el norte de Argentina, abarcando México, los Andes y el altiplano brasileño, y su distribución principal en Argentina, Brasil y Paraguay[2].

Morfológicamente (Figura 2), presenta un crecimiento erecto o semipostrado, con una altura alrededor de 50 - 120 cm, con tallos erguidos y hojas de forma variables, con superficies lisas y cerosas, que le ayudan a reducir la pérdida de agua y una adaptación a ambientes áridos, con flores

pequeñas de color blancas o púrpura pálida. Después de la polinización, produce pequeños aquenios, que ayudan a dispersar las semillas, facilitando la propagación y el cultivo de la planta[37].



Figura 9. Planta de *Stevia rebaudiana* Bertoni obtenida en el Laboratorio Ecológico de Hidroponía del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional

La investigación de *Stevia rebaudiana Bertoni* ha comprobado que sirve como un edulcorante natural y una fuente rica en metabolitos bioactivos, hasta ahora se ha logrado aislar e identificar, mediante los extractos de sus hojas alrededor de 150 compuestos bioactivos: como aminoácidos, ácidos grasos, glicerolípidos, oligosacáridos, polisacáridos, fibra dietética, aceites esenciales, vitaminas hidrosolubles, minerales y compuestos fenólicos, que le conceden una actividad antioxidante, por su elevado contenido de polifenoles como; fenoles simples (pirogalol y 4-metilcatecol), ácidos fenólicos (derivados de ácido benzoico y los derivados del ácido cinámico) y flavonoides (flavonas, flavonoles, flavanoles)[37].

Antioxidantes y estrés oxidativo

El estrés oxidativo es una condición de desequilibrio entre la producción de radicales libres y la capacidad del cuerpo para neutralizarlo o reparar el daño resultante. Esto puede ser el resultado de una mayor producción de radicales libres, una disminución de las defensas antioxidantes o ambas. Los principales tipos de radicales libres incluyen: especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (RNS). Los ROS son radicales libres que contienen oxígeno y desempeñan funciones cruciales tanto en procesos fisiológicos como patológicos. Por otro lado, las RNS incluyen radicales que contienen nitrógeno[8].

Los altos niveles de ROS y RNS, son radicales libres que pueden originarse de forma endógena o exógena. Las fuentes endógenas incluyen: reacciones enzimáticas, activación de células inmunes, las reacciones mitocondriales y las respuestas inflamatorias, mientras que las fuentes exógenas abarcan la radiación, la contaminación atmosférica, los carcinógenos ambientales, las toxinas, el alcohol, el humo del tabaco, los disolventes sintéticos, los fármacos, la alimentación y los productos químicos industriales[23]. Diversos estudios epidemiológicos relacionan la actividad del estrés oxidativo con el daño a nivel celular y tisular, ya que induce daño al ADN, modificación postraduccional de proteínas, peroxidación lipídica, inflamación y la disfunción de las mitocondrias, fenómenos que se relacionan con el desarrollo de distintas enfermedades[36] como la diabetes, padecimientos cardiovasculares, cáncer y enfermedades neurodegenerativas, actuando como puente o mediador que convierte factores de riesgo en daño celular, derivando en un estado inflamatorio crónico que aumenta la producción de radicales libres, superando las defensas antioxidantes[13].

Los compuestos antioxidantes son moléculas de tamaño pequeño capaces de proteger a las células, retardando o previniendo la oxidación de otras moléculas, mediante la liberación de electrones al medio u otro mecanismo. Ayudan a la descomposición y a la eliminación de los radicales libres y otras especies reactivas de oxígeno y nitrógeno[3,4]. De origen exógeno y/o endógeno. Los endógenos son aquellos que a causa de la exposición a los radicales libres se desarrollan dentro del organismo, tal es el caso de la remoción a través de la catálisis de radicales por diferentes enzimas como la catalasa y superóxido dismutasa (sistema de defensa enzimático); mientras que los exógenos provienen de los alimentos que se ingieren, principalmente de las frutas y verduras con colores intensos; en las semillas, también en microorganismos, hongos, algunas partes de las plantas y en tejidos de animales[35].

Estos compuestos presentes en alimentos ayudan a mejorar el sistema inmunológico, previenen daño celular, reducen la inflamación, pueden mejorar la función cognitiva, poseen propiedades antienvejecimiento y previenen, tratan o retrasan el desarrollo de enfermedades no transmisibles (ENT), el efecto de este depende de la dosis, tiempo y la forma de administración, destacando que los distintos mecanismos que existen dependen del antioxidante en cuestión[7].

Su cuantificación resulta útil para evaluar la calidad antioxidante de alimentos, extractos o la capacidad antioxidante de tejidos, fluidos biológicos y la biodisponibilidad de estos compuestos para el cuerpo humano. El comprobar y la cuantificación de estas propiedades son temas de interés y de ayuda, para la industria, los investigadores, la agricultura, los médicos y los profesionales del área de la salud[4]. Este tipo de evaluaciones en los alimentos se suele medir de manera *in vitro*, utilizando diferentes técnicas analíticas. En la literatura han surgido y propuesto varios métodos para la evaluación de la capacidad antioxidante total, y cada uno varía según el principio y la metodología, como también su sensibilidad a diferentes antioxidantes, por lo tanto, existirá una variabilidad en los resultados y esto dependerá del tipo de prueba que se utilice[6].

PARTE EXPERIMENTAL

Se realizó en el Laboratorio Ecológico de Hidroponía del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, ubicado en Yautepec, Morelos, México (Latitud 18.82471433368965, - longitud 99.09624965731713). Para el estudio se utilizaron plantas de *Justicia secunda* Vahl y *Stevia rebaudiana* Bertoni, las cuales fueron propagadas *in vitro* y posteriormente transferidas a un sistema hidropónico para su aclimatación durante un mes. Después, las plantas se dejaron crecer en macetas con una mezcla de agrolita, fibra de coco y peat moss (1:1:1), recibiendo solución nutritiva Steiner los días miércoles y viernes, y agua solo los lunes durante dos meses.

Una vez alcanzado el desarrollo adecuado, se realizó la caracterización morfológica de las plantas y hojas mediante la evaluación de variables como la altura de la planta, número de nodos, peso fresco, área foliar, longitud, perímetro, radio y color de las hojas en estado fresco y seco. Posteriormente, las hojas de ambas plantas fueron recolectadas, seleccionadas y lavadas. El material vegetal fue sometido a un proceso de deshidratación natural bajo sombra, con luz indirecta y con ventilación adecuada. Después del secado, las muestras se molieron y tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula de 500 µm, obteniéndose un polvo homogéneo que fue almacenado en condiciones adecuadas para preservar sus propiedades fisicoquímicas.

Los análisis químicos se llevaron a cabo en el Área académica de Nutrición en el Instituto de Ciencias de la Salud perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. A partir del material seco se realizó una extracción acuosa-orgánica utilizando mezclas de metanol/agua y acetona/agua para obtener los compuestos presentes en las hojas. Los extractos obtenidos fueron utilizados para evaluar la capacidad antioxidante mediante los métodos ABTS, DPPH y FRAP. Asimismo, se cuantificaron diversos compuestos con actividad antioxidante, antocianinas, compuestos fenólicos totales, flavonoides, ácido ascórbico y clorofilas a, b y total. Finalmente, todos los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadísticos para determinar y comparar el comportamiento de ambas especies cultivadas en hidroponía.

RESULTADOS

Ambas plantas poseen compuestos bioactivos con potencial antioxidante, aunque en diferentes concentraciones. Los resultados obtenidos (Tabla 1) muestran que, *Stevia rebaudiana* presentó valores superiores en los tres métodos analizados, alcanzando 725.82 ± 4.67 µmol ET/100 g bs en ABTS, 29453.6 ± 377.1 µmol ET/100 g bs en DPPH y 2845.2 ± 9.4 µmol Fe (II)/100 g bs en FRAP. Por otro lado, *Justicia secunda* mostró valores menores, con 347.59 ± 4.67 µmol ET/100 g bs en ABTS, 1459.9 ± 13.2 µmol ET/100 g bs en DPPH y 380.8 ± 2.4 µmol Fe (II)/100 g bs en FRAP.

Estas diferencias pueden estar relacionadas con la composición fitoquímica de cada especie, particularmente con la concentración de compuestos fenólicos, flavonoides y otros metabolitos secundarios capaces de neutralizar radicales libres. Diversos estudios han señalado que *Stevia rebaudiana* contiene altas cantidades de compuestos fenólicos, glucósido de esteviol, rebaudiósidos, flavonoides, entre otros, explicando su elevada actividad antioxidante. Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con diferentes estudios, quienes encontraron valores altos de capacidad antioxidante (Tabla 2) en extractos de *Stevia* mediante los métodos ABTS, DPPH y FRAP. Sin embargo, los valores obtenidos en esta investigación fueron muy superiores a los reportes previos, en especial en el ensayo DPPH.

En el caso de *Justicia secunda*, aunque presentó valores menores respecto a *Stevia*, la especie mostró una actividad antioxidante considerable, principalmente en el método FRAP, indicando una capacidad importante para reducir iones férricos. Los resultados obtenidos en este estudio fueron superiores a los reportados por Swiatek y colaboradores (2023) para ABTS y DPPH, donde se obtuvieron valores de 227.90 ± 3.36 y 92.32 ± 0.80 µmol ET/100 g bs, respectivamente. Esto sugiere que las muestras analizadas en este estudio poseen una mayor concentración de compuestos reductores o una mejor eficiencia extractiva. Asimismo, el valor de FRAP obtenido (380.8 ± 2.4 µmol Fe (II)/100 g bs) fue notablemente mayor al reportado por Uchegbu y colaboradores (2024), quienes encontraron valores cercanos a 40.13 µmol Fe (II)/100 g bs.

Las variaciones observadas entre estudios son comunes en investigaciones fitoquímicas debido a diferentes factores como: la obtención de la planta (silvestre o hidropónica), los factores ambientales (bióticos y abióticos) en los que se desarrolló la planta, la preparación de la muestra (deshidratación y tipo de partícula), el tipo extracción (naturaleza del disolvente, temperatura, tiempo, relación sólida/disolvente, agitación, pH, etc.) y la técnica utilizada para el análisis estudio.

En general, los resultados obtenidos demuestran que ambas especies poseen un importante potencial antioxidante, destacando especialmente *Stevia rebaudiana* Bertoni por su elevada capacidad para neutralizar radicales libres y reducir agentes oxidantes. No obstante, *Justicia secunda* Vahl también representa una fuente importante de compuestos antioxidantes naturales.

Tabla 5. Capacidad antioxidante de Justicia secunda *Vahl y Stevia rebaudiana Bertoni*

Método	*Justicia secunda* Vahl	*Stevia Rebaudiana* Bertoni
ABTS (µmol ET/100 g bs)	347.59 ± 4.67	725.82 ± 4.67
DPPH (µmol ET/100 g bs)	1459.9 ± 13.2	29453.6 ± 377.1
FRAP (µmol Fe (II)/100 g bs)	380.8 ± 2.4	2845.2 ± 9.4

Los valores representan (promedio ± DE); µmol ET: micromoles equivalentes de Trolox; µmol Fe (II)): micromoles de hierro; bs base seca. Nivel de significancia del 95% (P> 0.05)

Tabla 6. Estudios previos de la capacidad antioxidante de las plantas de estudio

Método (µmol ET/100 g bs)	*Justicia secunda* Vahl	*Stevia Rebaudiana* Bertoni	*Referencia*
ABTS	227.90 ± 3.36	541	Świątek, *et al*. (2023)
		311.01 ± 4.50	Morales (2017)
			Mendoza, *et al*. (2020)
DPPH	92.32 ± 0.80	648	Świątek, *et al*. (2023)
		176.57 ± 6.64	Morales (2017)
			Mendoza, *et al*. (2020)

FRAP (µmol Fe (II)/100 g bs)	40.13	35.43 ± 0.24 96.25 ± 3.96	Uchegbu. *et al*. (2024) Shahu R., *et al*. (2022) Ávarez, *et al.* (2016)

Los valores representan (promedio ± DE); µmol ET: micromoles equivalentes de Trolox; µmol Fe (II)): micromoles de hierro; bs base seca.

La cuantificación de compuestos antioxidantes en *Justicia secunda Vahl* y *Stevia rebaudiana Bertoni* evidenció diferencias importantes en la concentración de metabolitos secundarios asociados con la actividad antioxidante de ambas especies (Tabla 3). Los resultados obtenidos muestran que *Stevia rebaudiana* presentó mayores concentraciones de ácido ascórbico, fenoles totales y flavonoides, mientras que Justicia secunda destacó por su contenido de antocianinas y clorofilas.

En el caso del ácido ascórbico, *Stevia rebaudiana* registró un contenido de 1769 ± 172.5 mg EAA/100 g bs, valor superior al obtenido en *Justicia secunda* (865.3 ± 172.4 mg EAA/100 g bs). Aunque en la literatura consultada no se encontraron datos comparativos para ambas especies, los resultados sugieren que ambas plantas y en mayor cantidad *Stevia* constituye una fuente importante de vitamina C, compuesto reconocido por su capacidad para neutralizar radicales libres y prevenir procesos de oxidación celular. La elevada concentración encontrada podría estar relacionada con factores como el estado fisiológico de la planta, las condiciones ambientales y el método de extracción empleado.

Respecto a las antocianinas, únicamente *Justicia* secunda es la que presenta estos metabolitos y se ven reflejados en sus flores pues cuando estas se van desarrollando se tornan a un color rojizo, asociada a la presencia de antocianinas, teniendo un valor de 6.42 ± 0.014 mg Cy3Gl/100 g bs, por lo cual que en *Stevia rebaudiana* no se cuantificó este compuesto. Comparado con Valiente (2024), quien reportó 0.10 ± 0.02 mg Cy3Gl/100 g bs, los valores obtenidos en este estudio fueron considerablemente superiores, lo cual podría indicar una mayor acumulación de pigmentos antioxidantes en las muestras analizadas. Estas diferencias podrían atribuirse al cultivo hidropónico, así como las condiciones de cultivo o diferencias metodológicas en la extracción y cuantificación.

En relación con los fenoles totales, ambas especies mostraron concentraciones elevadas; sin embargo, *Stevia* rebaudiana presentó el mayor contenido con 7433.7 ± 20.7 mg GAE/100 g bs, mientras que Justicia secunda alcanzó 785.1 ± 1.2 mg GAE/100 g bs. Los resultados obtenidos de ambas plantas fueron superiores a los reportados por diferentes autores (Tabla 4), quienes registraron concentraciones entre 26.56 y 90.3 mg GAE/100 g bs. Sugiriendo que las muestras utilizadas en este estudio poseen una alta acumulación de compuestos fenólicos, los cuales son considerados responsables de gran parte de la capacidad antioxidante observada previamente en las pruebas ABTS, DPPH y FRAP.

Por otra parte, *Justicia secunda* mostró un contenido de flavonoides de 2803.7 ± 27.2 mg QE/100 g bs, un valor inferior al encontrado en *Stevia rebaudiana* (14856 ± 36.3 mg QE/100 g bs). Al comparar estos resultados con los reportados por Koffi, *et al*. (2023) y Ruiz, *et al*. (2015), quienes encontraron valores entre 36.7 y 135.18 mg QE/100 g bs, observando que las concentraciones obtenidas en esta investigación fueron más altas. Los flavonoides son metabolitos secundarios con alta capacidad antioxidante y antiinflamatoria, por lo que su abundancia podría explicar la elevada actividad antioxidante registrada en ambas especies.

El contenido de clorofila, *Justicia secunda* presentó valores de 1.22 ± 0.06 mg/g de bs para clorofila a, 3.5 ± 0.2 mg/g de bs para clorofila b y 4.7 ± 0.2 mg/g de bs para clorofila total, sin embargo, no existen datos previos sobre la cuantificación de la clorofila respecto al género de *Justicia*, siendo imposible comparar este dato. En cuanto a *Stevia rebaudiana* se obtuvieron valores de 1.14 ± 0.01, 3.1 ± 0.2 y 4.2 ± 0.2 mg/g de bs, respectivamente. Estos resultados fueron inferiores a los reportados por Ruiz y colaboradores (2015), quienes encontraron concentraciones de 3, 4 y 7 mg/g de bs en Stevia. Esta diferencia de concentraciones, se le podría atribuir al tamaño de las hojas, pues las *Stevia* son de un tamaño más pequeño en comparación a las de *Justicia*. Las clorofilas, además de participar en la fotosíntesis, poseen propiedades antioxidantes debido a su capacidad para inhibir procesos oxidativos y neutralizar especies reactivas de oxígeno.

Tabla 7. Cuantificación de compuestos con capacidad antioxidantes de Justicia secunda Vahl y Stevia rebaudiana Bertoni

Compuestos	*Justicia secunda* Vahl	*Stevia Rebaudiana* Bertoni
Ácido ascórbico (mg EAA/100 g bs)	865.3 ± 172.4	1769 ± 172.5
Antocianinas (mg Cy3Gl/100 g bs)	6.423 ± 0.014	-
Fenoles (mg GAE/100 g bs)	785.1 ± 1.2	7433.7 ± 20.7
Flavonoides (mg QE/100 g bs)	2803.7 ± 27.2	14856 ± 36.3
Clorofila a (mg/g de bs)	1.22 ± 0.06	1.14 ± 0.01
Clorofila b (mg/g de bs)	3.5 ± 0.2	3.1 ± 0.2
Clorofila total (mg/g de bs)	4.7 ± 0.2	4.2 ± 0.2

Los valores representan (promedio ± DE) los datos provienen de los experimentos. (mg EAA): equivalentes de Ácido Ascórbico, (mg Cy3Gl): miligramos de Cianidina-3-glucósido, (mg GAE): miligramos de equivalentes de ácido gálico, (mg QE): miligramos equivalentes de quercetina, (mg/g de bs): mg de clorofila por gramos de base seca. Utilizando un nivel de significancia del 95% (P> 0.05).

Tabla 8. Estudios previos sobre la cuantificación de compuestos con capacidad antioxidantes de Justicia secunda Vahl y Stevia rebaudiana Bertoni

Compuestos	*Justicia secunda* Vahl	*Stevia Rebaudiana* Bertoni	Referencia
Ácido ascórbico (mg EAA/100 g)	S/D	S/D	
Antocianinas (mg Cy3Gl/100g)	0.10 ± 0.02	-	Valiente (2024)
Fenoles (mg GAE/100 g)	58.07	90.3	Świątek, *et al*. (2023) Koffi *et al*. (2023)
	26.56 ± 0.70	61.50	Ávarez, *et al*. (2016) Shukla *et al*. (2015)
Flavonoides (mg QE)	135.18 ± 24.82	39.3	Koffi *et al*. (2023)
		36.7	Ruiz, *et al*. (2015)
Clorofila a (mg/g)	S/D	3	
Clorofila b (mg/g)	S/D	4	Ruiz, *et al*. (2015)
Clorofila total (mg/g)	S/D	7	

Los valores representan (promedio ± DE). (mg EAA): equivalentes de Ácido Ascórbico, (mg Cy3Gl): miligramos de Cianidina-3-glucósido, (mg GAE): miligramos de equivalentes de ácido gálico, (mg QE): miligramos equivalentes de quercetina, (mg/g de bs): mg de clorofila por gramos de base seca, (S/D): sin datos

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que tanto *Stevia rebaudiana* y *Justicia secunda* son fuentes importantes de compuestos antioxidantes naturales. A pesar de que existan diferencias bastante amplias, estas diferencias fitoquímicas reflejan la diversidad metabólica de cada especie y respaldan su potencial uso en aplicaciones nutracéuticas, farmacológicas y alimentarias.

CONCLUSIONES

Esta investigación permitió evidenciar que *Justicia secunda Vahl* y *Stevia rebaudiana Bertoni* poseen compuestos bioactivos con actividad antioxidante significativa. Al comparar los valores de capacidad antioxidante de ambas especies reportados en la literatura con los obtenidos en este estudio, indica que el cultivo hidropónico entre otros factores induce un mayor rendimiento de compuestos con capacidad antioxidante. Los métodos analíticos empleados confirmaron la capacidad de estas plantas para neutralizar radicales libres, respaldando científicamente su uso en la medicina tradicional como agentes terapéuticos.

Estas especies de plantas representan una alternativa natural viable frente al estrés oxidativo, aprovechando su potencial en la industria alimentaria, farmacéutica y nutracéutica. La investigación aporta y contribuye al conocimiento de plantas medicinales cultivadas en hidroponía, aportando nueva información sobre ellas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez-Robles M., López-Orenes A., Ferrer M., Calderón A. (2016). Methanol elicits the accumulation of bioactive steviol glycosides and phenolics in *Stevia rebaudiana* shoot cultures. *Industrial Crops and Products*, Volume 87, 273-279. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.054.
2. Aswin Sakthivel, M., & Ramesh Kumar, S. (2025). Stevia (Stevia rebaudiana Bertoni): Sweet medicine for a healthier world. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21, 101980. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101980
3. Bako Bulus. (2024). A Comprehensive Review of Solvent-Induced Variability in Antioxidant Profiling of Plants Extract: Justicia secunda. Progress in Chemical and Biochemical Research. B, 6, 1–10. https://doi.org/10.48309/ajcb.2024.412568.1192
4. Benítez-Estrada, A., Villanueva-Sánchez, J., González-Rosendo, G., Alcántar-Rodríguez, V. E., Puga-Díaz, R., & Quintero-Gutiérrez, A. G. (2020). Determinación de la capacidad antioxidante total de alimentos y plasma humano por fotoquimioluminiscencia: Correlación con ensayos fluorométricos (ORAC) y espectrofotométricos (FRAP). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 23, e20200244. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.244
5. Briones, E. R., Hernández, B. C. R., & Martínez, P. B. G. (2025). Bioeconomía desde la etnobotánica: Plantas ancestrales, moléculas actuales. En Bioeconomía en Latinoamérica: Desafíos para la sostenibilidad y el desarrollo (Vol. 3, pp. 108–134). *Mentefactura Bioeconómica*. https://doi.org/10.32870/9786075815114
6. Campo-Banguero, L. M., & Ramírez-Navas, J. S. (2021) Antioxidant capacity in ice cream and dairy products. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 8(1), 23–41. https://doi.org/10.23850/24220582.3982
7. Cervantes-Valencia, M. E., López-Valdez, N., Rojas-Lemus, M., González-Villalva, A., Morales-Ricardes, G., Bizarro-Nevares, P., Ustarroz-Cano, M., Salgado-Hernández, J. Á., Mendoza-Martínez, S., Lamas-Orozco, L. M., & Fortoul, T. I. (2024). Antioxidantes naturales y su efecto contra el estrés oxidante provocado por la contaminación por material particulado. *Revista de la Facultad de Medicina*, 67(4), 7–20. https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2024.67.4.02
8. Chandimali, N., Bak, S., Park, E., Lim, H., Won, Y., Kim, E. Park, S., Lee S. (2025). Free radicals and their impact on health and antioxidant defenses: a review. *Cell Death Discov*. 11, 19. https://doi.org/10.1038/s41420-024-02278-8
9. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2023). Plantas medicinales. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/medicinal/plantas
10. Contreras Velázquez, K. G. (2023). Plantas medicinales aromáticas y hortalizas en cultivo hidropónico; orquídeas y cactus desarrollados en invernadero urbano [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/42954
11. Fregoso-Aguilar, T., Escamilla-Ramírez, P. X., Nicolás-Álvarez, D. E., Mendoza-Pérez, J. A., Madrigal-Santillán, E. O., Tirado-Lule, J. M., Rodríguez-Negrete, E. V., Madrigal-Bujaidar, E., Álvarez-González, I., Ibáñez-Cervantes, G., Morales-González, Á., & Morales-Gonzalez, J. A. (2025). Effect of Chronic Administration of Justicia secunda Vahl in Mice Diabetized with Streptozotocin. *Diabetology*, 6(6), 56. https://doi.org/10.3390/diabetology6060056
12. Hernández, M. P., Ruscitti M. F., Calonge F. S., Alejanda. Carbone, V., & Bueno Prieto J. E. (2024). Estudio Fisiológico de Canna indica (Cannaceae), una Fuente Alimenticia, en Medios de Cultivo no Convencionales. *Revista Ciencias Naturales*, 2(1), 22–35. https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/rfcn/article/view/4252
13. Husain, S., Hillmann, K., Hengst, K., & Englert, H. (2023). Effects of a lifestyle intervention on the biomarkers of oxidative stress in non-communicable diseases: A systematic review. *Front*, Aging 4:1085511. https://doi.org/10.3389/fragi.2023.1085511
14. Inkoto, C. N., Koto-Te-Nyiwa, T. D., Mpiana, P. T., Tshilanda, D., Lengbiye, E., Muanyishay, C. L., Kitadi, J. M., & Gbolo, B. Z. (2019). *Justicia secunda* Vahl species: Phytochemistry, Pharmacology and Future Directions: A mini-review. *Discovery Phytomedicine*, 6(4), 157–171. https://doi.org/10.15562/phytomedicine.2019.93
15. Kaushal, S., Kumar, A., Singh, N. & Singh A. (2026). Medicinal and aromatic plants under hydroponic systems: A comprehensive review. International Journal of Research in Agronomy, 9(4), 658–663. https://doi.org/10.33545/2618060X.2026.v9.i4i.5448

16. Koffi, K. A., Konan, L. M., & N'Guessan, A. H. (2023). Total phenols, flavonoids and antioxidant potential of *Justicia secunda* Vahl leaf extracts. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 11(1), 45–52. DOI 10.17660/ActaHortic.2023.1358.28
17. López, S., Vera, J., Gunzha, F., Freire, E., & Pujos, M. (2022). Automatización del control de nutrientes en hidroponía mediante el uso de un sistema embebido. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 7(7), 814–826. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9042908
18. López, T., Morillo, M., Visbal, T., & Carmona, J. (2022). Estudio fitoquímico, actividad antioxidante y toxicidad sobre Artemia salina de los extractos de hojas de *Justicia secunda* Vahl (Acanthaceae). *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 51(1), 213–229. https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v51n1.95333
19. Mendoza-Isaza, N., Hoyos-Arbeláez, J., & Peláez-Jaramillo, C. (2020). Capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales de extractos de tallo de *Stevia rebaudiana* en varios modelos in vitro. *Revista EIA*, 17(34), 53-61. Epub August 28, 2021.https://doi.org/10.24050/reia.v17i34.1282
20. Morales, F. J., & Jiménez-Pérez, S. (2001). Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food Chemistry*, 72, 119–125. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(00)00239-9
21. Onyema, N. C. R., Ene, N. A. C., Nwaoguikpe, N. R. N., & Igwe, N. C. U. (2024). Haematological and biochemical studies on Justicia secunda infusion used in treatment of anaemia. *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(2), 57–68. https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.2.0286
22. Pant, P., Pandey, S., Dall'Acqua, S. (2021). The Influence of Environmental Conditions on Secondary Metabolites in Medicinal Plants: A Literature Review. Chemistry & Biodiversity, 18(11), 1612-1872. https://doi.org/10.1002/cbdv.202100345
23. Papaefthimiou, M., Kontou, P. I., Bagos, P. G., & Braliou, G. G. (2024). Integration of Antioxidant Activity Assays Data of *Stevia* Leaf Extracts: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Antioxidants*,13(6), 692. https://doi.org/10.3390/antiox13060692
24. Pizarro B., V., Jana A., C., Contreras S., C., Alfaro E., V. & Ibacache A., G. (2022). Invernaderos en hidroponía funcionalidad y diseño. *La Serena, Chile: Informativo INIA Intihuasi*, Nº 108. https://hdl.handle.net/20.500.14001/68548
25. Raghu, A., & Velayudhannair, K. (2023). Phytochemical Analysis and Antibacterial Potential of *Stevia rebaudiana* (Bertoni, 1899) Leaf Extracts against Aeromonas Species: Influence of Extraction Methods and Solvents in Aquaculture Applications. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(4), 2352–2366. https://doi.org/10.22207/JPAM.17.4.31
26. Ramos, S. (2022). Hidroponía: Aprenda Cómo Empezar Fácilmente con su Propio Jardín de Invernadero a Través del Sistema de Cultivo Hidropónico DIY (Cultivar Alimentos Orgánicos).https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=DwGEEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=hidropon%C3%ADa++que+es&ots=AWpOYRsUin&sig=zU1w29zgO2lVcbDjW0iYNCxYM_Q&redir_esc=y#v=onepage&q=hidropon%C3%ADa%20%20que%20es&f=false
27. Ruiz Ruiz, Jorge Carlos, Moguel Ordoñez, Yolanda Beatriz, Matus Basto, Ángel, & Segura Campos, Maira Rubi. (2015). Antioxidant capacity of leaf extracts from two *Stevia rebaudiana* Bertoni varieties adapted to cultivation in Mexico. *Nutrición Hospitalaria*, 31 (3), 1163-1170. https://dx.doi.org/10.3305/nh.2015.31.3.8043
28. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). México, segundo lugar mundial en registro de plantas medicinales. Gobierno de México. https://www.gob.mx/agricultura/yucatan/articulos/mexico-segundo-lugar-mundial-en-registro-de-plantas-medicinales-294271
29. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). Plantas medicinales de México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/plantas-medicinales-de-mexico
30. Shahu, R., Jobby, R., Patil, S., Bhori M., Tungare K. & Jhaet P. (2022). Phytochemical content and antioxidant activity of different varieties of *Stevia rebaudiana*. *Hortic. Environ. Biotechnol*, 63, 935–948. https://doi.org/10.1007/s13580-022-00451-5

31. Shukla, S., Mehta, A., Bajpai, V. K., & Shukla, S. (2015). In vitro antioxidant activity and total phenolic content of dried leaves of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Food Chemistry*, 168, 546–552. https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.06.024
32. Świątek, Ł., Sieniawska, E., Sinan, K. I., Zengin, G., Boguszewska, A., Hryć, B., Bene, K., Polz-Dacewicz, M., & Dall'Acqua, S. (2023). hemical Characterization of Different Extracts of *Justicia secunda* Vahl and Determination of Their Anti-Oxidant, Anti-Enzymatic, Anti-Viral, and Cytotoxic Properties. *Antioxidants*, 12(2), 509. https://doi.org/10.3390/antiox12020509
33. Uchegbu, N., Fasuan, T., Onuoha, N. & Bola A. (2024). Biochemical and functional groups characteristics of tea blends from *Ficus capensis* and *Justicia secunda*. *Food Prod Process and Nutr*, 6 , 61. https://doi.org/10.1186/s43014-024-00237-5
34. Valiente-García Milca J. (2024) *Diseño y Elaboración de una Bebida Funcional a partir de Jamaica (Hibiscus sabdariffa) y Muicle (Justicia spicigera)* [Informe de Estadía Técnica, Universidad Tecnológica de Izucar de Matamoros] https://surl.li/okxtov
35. Vázquez-Ovando, A., Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., & Velázquez-Ovalle, G. (2022). Antioxidant capacity: concepts, quantification methods and use for tropical fruits and derived products characterization. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. 9(1), 9–33. https://doi.org/10.23850/24220582.4023
36. Vivanco, D., Ardiles, P., Castillo, D., & Puente, L. (2021). Emerging technology: Pulsed Electric Fields (PEF) for food treatment and its effect on antioxidant content. *Revista Chilena de Nutrición*, 48(4), 609–619. https://doi.org/10.4067/S0717-75182021000400609
37. Wang, L., Chang, T., Zhu, T., Hu, W., Wang, X., Dong, C., Sun, Y., Zhang, T., Jiang, Y., Zhao, C., Cui, Y., Guo, J., & Liao, X. (2025). *Stevia rebaudiana* Bertoni as a sweet herbal medicine: traditional uses, potential applications, and future development. *Front Pharmacol*, 16, 1638147. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1638147
38. World Health Organization. Programme on Traditional Medicine (2002). Estrategía de la OMS sobre medicina tradicional 2002-2005. Organización Mundial de la Salud. https://iris.who.int/handle/10665/67314

INFLUENCIA DE DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA LED EN EL RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE *Pleurotus Ostreatus*

Nalleli Trancoso Reyes [1(*)], Laura Anabel Páez Olivan [1], Carmen Zulema Quiñones Pérez [1], Jaime Herrera Gamboa [1], Artemisa Luevano de la Cruz [2], Merit Cisneros González [1], Luis Enrique Nevárez Cabada [1], Johana Judith Sainz Ortega[1]

[1]SECIHTI-Instituto Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana. [2]Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130.
*natrancoso@gmail.com

RESUMEN

El estudio se centró en la influencia de diferentes longitudes de onda de luz LED en la producción de *Pleurotus ostreatus,* un hongo de interés comercial, mismo que destaca por ser una fuente rica en proteínas, fibra, vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes, además de poseer actividades antitumorales, inmunomoduladoras y antiinflamatorias. La investigación determinó el rendimiento y la eficiencia biológica, así como las características morfológicas y microestructurales de este hongo al ser cultivado bajo distintas condiciones lumínicas (450 y 610 nm), contribuyendo así a optimizar su producción en entornos controlados. Durante el ciclo productivo, se monitorizaron varios rasgos productivos, recolectando los datos de los cuerpos fructíferos en estado de madurez comercial. El análisis de cambios microestructurales se llevó a cabo por microscopía electrónica de barrido mediante un microscopio electrónico de barrido marca HITACHI, modelo SU3500. Los tratamientos de luz utilizados fueron: luz blanca (CB), luz roja (CR) y luz azul (CA). Los análisis estadísticos se realizaron mediante un análisis de comparación múltiple de medias entre tratamientos, utilizando la prueba de rangos múltiples de Tukey, con un nivel de significancia de $P<0.05$. Los resultados mostraron que la luz azul y roja favorecieron la conversión del sustrato seco en biomasa comestible, con incrementos de rendimiento del 15–20 % en comparación con la luz blanca. La eficiencia biológica fue significativamente mayor bajo luz azul (35,6 %) y roja (34,9 %) en comparación con la blanca (27,9 %). En cuanto a la morfología de los cuerpos fructíferos, la luz azul produjo píleos más grandes (105,5 mm) y estípites más gruesos (20,8 mm), lo que indica una mejor calidad comercial. La luz roja promovió un mayor alargamiento del estípite, mientras que la luz blanca resultó en cuerpos fructíferos más pequeños y delgados. Los hallazgos sugirieron que la luz azul fue la más efectiva para maximizar la eficiencia biológica y mejorar la calidad de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus*. La luz roja también tuvo un papel positivo, especialmente en la producción de estípites alargados, que pueden ser atractivos para mercados gourmet. En contraste, la luz blanca no se recomienda debido a su menor rendimiento y calidad. Por otra parte, el análisis mediante microscopía electrónica de barrido confirmó que los tratamientos LED no provocaron daños estructurales visibles en la superficie del hongo. Estos resultados fueron consistentes con estudios previos y ofrecieron una guía valiosa para la producción comercial de setas, destacando la importancia de la manipulación de las condiciones lumínicas para optimizar la producción de hongos comestibles.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de diodos emisores de luz (LED) representa un método innovador para la conservación de alimentos. Esta tecnología tiene el potencial de revolucionar la producción y preservación de cultivos debido a su eficiencia económica. Los LED pueden mejorar la vida útil de los alimentos, controlar la maduración de frutas e inducir la síntesis de compuestos bioactivos y antioxidantes. La investigación sobre el uso de esta tecnología en productos hortofrutícolas ha experimentado un notable avance en la última década, enfocándose principalmente en la fase de cultivo dejando un amplio campo inexplorado en el área de postcosecha. La conservación postcosecha de los alimentos constituye uno de los mayores retos para la cadena agroalimentaria, pues la pérdida de calidad y

valor nutricional durante el almacenamiento reduce significativamente la rentabilidad y la disponibilidad de los alimentos. Por todo lo anterior es importante realizar investigación integral en la fase de cosecha y postcosecha, determinar el efecto de la luz LED sobre el rendimiento y la eficiencia biológica, así como las características morfológicas y microestructurales del hongo *Pleurotus ostreatus* al ser cultivado bajo distintas condiciones lumínicas (450 y 610 nm), contribuyendo así a optimizar la producción en entornos controlados.

TEORÍA

La demanda comercial del *Pleurotus spp*. es menor que otros hongos debido a que su vida útil es más corta, por ello la importancia de buscar alternativas de postcosecha que permitan un mayor tiempo de almacenamiento. Se conocen cerca de 40 especies del género *Pleurotus ssp*, se sabe que el *Pleurotus ostreatus* es un hongo de interés comercial, mismo que destaca por ser una fuente rica en proteínas, fibra, vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes, además de poseer actividades antitumorales, inmunomoduladoras y antiinflamatorias; en el mismo sentido, la especie de *Pleurotus spp.* es reconocida por sus propiedades medicinales derivadas de compuestos bioactivos de alto peso molecular (polisacáridos, péptidos y proteínas) y compuestos de bajo peso molecular (terpenoides, ésteres de ácidos grasos y polifenoles) (Golak-Siwulska, et al., 2018).

El cultivo exitoso de *Pleurotus ostreatus* no depende únicamente del hongo, sino de la capacidad para armonizar su nutrición y entorno. El rendimiento y la eficiencia biológica de esta especie encuentran su punto máximo cuando se logra optimizar los sustratos mediante condiciones ambientales precisas; en este sentido, la integración de iluminación LED con longitudes de onda específicas ha demostrado ser un catalizador clave tanto para la productividad como para la calidad final del cuerpo fructífero (De Bonis et al., 2024; Raman et al., 2020; Sena et al., 2024). Más allá de la cosecha, el desafío se traslada a la preservación de su frescura. La integridad de su microestructura celular es sumamente sensible al procesamiento, por lo que el uso de nuevas tecnologías representa una estrategia esencial para proteger su textura y prolongar su vida útil (Jafri et al., 2013; Yang et al., 2020). En última instancia, el crecimiento, desarrollo y la riqueza funcional del hongo especialmente la síntesis de compuestos bioactivos es el resultado de un manejo integral donde la tecnología lumínica no solo mejora la forma, sino que potencia las propiedades fisicoquímicas y medicinales que lo definen como un alimento funcional de alto valor (Golak-Siwulska et al., 2018; Poonia et al., 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

El cultivo de Pleurotus ostreatus se realizó en el Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, México. Durante la incubación, la temperatura se mantuvo a 22°C, y en la etapa de cultivo a 16°C. Las bolsas de cultivo se colocaron en áreas separadas con luz roja (610nm), azul (450nm) y natural. El sustrato utilizado fue rastrojo de maíz. Para la fase de crecimiento, se usó un fotoperiodo de 8 horas de luz y 16 horas de oscuridad. Se realizaron 3 lotes experimentales por triplicado de tratamientos LED de Pleurotus ostreatus en la fase de cultivo, CB (cosecha blanca), CR (cosecha roja), CA (cosecha azul). Para la determinación de las características físicas, de rendimiento y eficiencia biológica se monitorearon los diferentes rasgos productivos, durante la cosecha se recolectaron y midieron las dimensiones de todos los cuerpos fructíferos en estado de madurez comercial, además se pesaron para obtener la eficiencia biológica (Ec. 1), relacionando el peso de las setas frescas con el peso del sustrato seco; también se determinó su rendimiento (Ec.2).

$$EB=\frac{\text{Peso fresco de cuerpos fructíferos}}{\text{Peso seco del sustrato}} \times 100 \qquad \text{Ec. 1}$$

$$R=\frac{\text{Peso fresco de cuerpos fructíferos}}{\text{Peso húmedo del sustrato}} \times 100 \qquad \text{Ec. 2}$$

En cuanto el análisis morfológico del *Pleurotus ostreatus* durante la fase postcosecha se observaron los cambios mediante microscopia electrónica de barrido mediante un microscopio electrónico de barrido marca HITACHI, modelo SU3500. Las condiciones de operación fueron 10kV como voltaje de aceleración. Las muestras analizadas se obtuvieron el día de la cosecha del *Pleurotus ostreatus*.

Los análisis estadísticos se realizaron mediante un análisis de comparación múltiple de medias entre tratamientos, utilizando la prueba de rangos múltiples de Tukey, con un nivel de significancia de $P<0.05$. El software utilizado para el análisis estadístico fue MINITAB (Minitab Inc. EUA).

RESULTADOS

El rendimiento y la eficiencia biológica se observan en la tabla 1, indicando que la luz azul y la roja favorecieron significativamente la conversión del sustrato seco en biomasa comestible, mientras que la luz blanca fue menos eficiente. El rendimiento confirma la superioridad del tratamiento de cosecha con luz azul y luz roja sobre la luz blanca, con incrementos de 15–20 %. Por otro lado, los resultados de la morfología de los cuerpos fructíferos se pueden analizar en la tabla 2.

En cuanto al efecto de la luz en la fructificación, la respuesta del hongo *Pleurotus ostreatus* a distintas longitudes de onda concuerda con estudios recientes. La exposición a luz azul (450–470 nm) activa fotorreceptores específicos, como los criptocromos, que regulan la morfogénesis y la expansión del píleo, produciendo carpóforos con sombreros de mayor diámetro y una coloración más intensa, características altamente valoradas en el mercado (De Bonis et al., 2024; Jang et al., 2013). Por el contrario, la luz roja tiende a promover un alargamiento del estípite, un fenómeno de elongación celular que busca optimizar la captura de estímulos lumínicos bajo condiciones de estrés espectral (Hassan et al., 2020). En cuanto a la eficiencia biológica (EB), los valores obtenidos en este estudio guardan consistencia con los reportados por autores como Bellettini et al. (2019) y Zied et al. (2021), quienes señalan rangos variables entre el 40% y el 90% dependiendo de la naturaleza del sustrato y el manejo del microclima. En cuanto a las implicaciones productivas de los resultados del presente estudio la Luz azul (CA) produjo la mayor EB, además mejoró el tamaño y grosor por lo que se recomendaría dicho tratamiento para la producción comercial de alta calidad. En cuanto a la luz roja (CR) estimuló la producción de carpóforos más alargados, lo que podría interesar a mercados donde prefieren las setas grandes.

Tabla 1. Eficiencia biológica y rendimiento con diferentes tratamientos de luz LED

Tratamiento	Eficiencia biológica %	Rendimiento %
CB	27.9 ± 2.02^{b}	55.8 ± 4.37^{b}
CR	34.9 ± 2.16^{a}	69.7 ± 3.10^{a}
CA	35.6 ± 2.08^{a}	71.2 ± 2.53^{a}

Tratamiento: CB (Cosecha con luz led blanca), CR (Cosecha con luz led roja), CA (Cosecha con luz led azul). Superíndices con letra minúscula indican diferencia significativa (P < 0.05) entre los tratamientos (promedio, n=4 por tratamiento ± desviación estándar)

Tabla 2. Morfología de los cuerpos fructíferos

Tratamiento	Diámetro píleo (mm)	Grosor estípite (mm)	Longitud estípite (mm)
CB	75.7 ± 8.49^{c}	15.4 ± 3.05^{b}	58.5 ± 7.92^{b}
CR	85.2 ± 10.35^{b}	19.9 ± 4.20^{a}	69.2 ± 8.42^{a}
CA	105.5 ± 21.21^{a}	20.8 ± 6.15^{a}	69.1 ± 10.45^{a}

Tratamiento: CB (Cosecha con luz led blanca), CR (Cosecha con luz led roja), CA (Cosecha con luz led azul). Superíndices con letra minúscula indican diferencia significativa (P < 0.05) entre los tratamientos (promedio, n=40 por tratamiento ± desviación estándar)

Referente al análisis mediante microscopía electrónica de barrido para la determinación del efecto de la luz LED a diferentes longitudes de onda, la Figura 1 muestra la morfología de los tres tratamientos analizados de las setas cosechadas. En todas las micrografías de manera general, se observan bordes ondulados a una magnificación de 2kX, los cuales son característicos del *Pleurotus*

spp. No se observaron alteraciones estructurales visibles, lo que indica que no se afecta la estructura microscópica por los diferentes espectros lumínicos bajo las condiciones analizadas en la fase de cosecha.

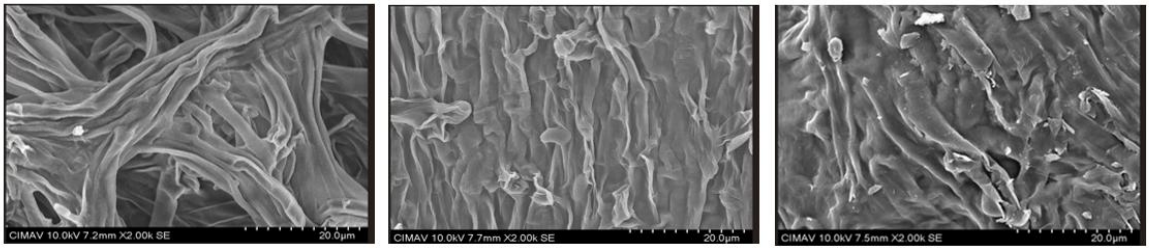


Figura 1. Micrografías de *Pleurotus ostreatus* obtenidas con diferentes tratamientos lumínicos (de izquierda a derecha CB, CR y CA)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de rendimiento y morfología de cuerpos fructíferos indican que, bajo luz azul, los píleos fueron significativamente más grandes y con estípites más gruesos, lo que indica mejor calidad comercial. La luz roja favoreció estípites largos, mientras que la luz blanca produjo carpóforos más pequeños y delgados. El rendimiento y eficiencia biológica se favorecieron por el uso de luz LED y no se presentó una modificación importante en la microestructura del *Pleurotus ostretus*. Estos resultados son consistentes con estudios previos y ofrecen una guía valiosa para la producción comercial de setas, destacando la importancia de la manipulación de las condiciones lumínicas para optimizar la producción de hongos comestibles.

BIBLIOGRAFÍA

1. De Bonis, M., Locatelli, S., Sambo, P., Zanin, G., Pecchia, J. A., & Nicoletto, C. (2024). Effect of Different LED Light Wavelengths on Production and Quality of Pleurotus ostreatus Grown on Different Commercial Substrates. Horticulturae, 10(4), 349.
2. Golak-Siwulska, I., Kałużewicz, A., Spiżewski, T., Siwulski, M., & Sobieralski, K. (2018). Bioactive compounds and medicinal properties of Oyster mushrooms (Pleurotus sp.). Folia Horticulturae, 30(2), 191-201.
3. Hassan, M. U., Rehman, S., Khalid, M. F., Abbas, M. W., & Farooq, M. (2020). Impact of Light Intensities and Wavelengths on the Growth and Yield of Oyster Mushroom (Pleurotus ostreatus). International Journal of Agriculture and Biology, 24(5), 1404-1410. fspublishers.org
4. Jafri, M., Jha, A., Bunkar, D. G., & Ram, R. C. (2013). Quality retention of oyster mushroom (Pleurotus florida) by combination of chemical treatments and modified atmosphere packaging. Postharvest Biology and Technology, 76, 112-118.
5. Jang, K. Y., Kim, H. J., Cho, S. J., Kim, S. J., Moon, J. W., & Oh, M. J. (2013). Effect of LED Light on the Morphological Characteristics and Productivity of Pleurotus ostreatus. Journal of Mushroom, 11(4), 181-186.
6. Poonia, A., Pandey, S., & Vasundhara. (2022). Application of light emitting diodes (LEDs) for food preservation, post-harvest losses and production of bioactive compounds: a review. Food Production, Processing and Nutrition, 4(1), 10.
7. Raman, J., Jang, K. Y., Oh, Y. L., Oh, M., Im, J. H., Lakshmanan, H., & Sabaratnam, V. (2020). Cultivation and Nutritional Value of Prominent Pleurotus spp.: An Overview. Mycobiology, 49(1), 1-14.
8. Sena, S., Kumari, S., Kumar, V., & Husen, A. (2024). Light emitting diode (LED) lights for the improvement of plant performance and production: A comprehensive review. Current Research in Biotechnology, 7, 100181.

9. Yang, R. L., Li, Q., & Hu, Q. P. (2020). Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of Pleurotus eryngii as affected by different drying methods. Scientific Reports, 10(1), 121.
10. Zied, D. C., Sánchez, J. E., & Pardo-Giménez, A. (2021). Biological Efficiency and Nutritional Value of *Pleurotus ostreatus* Cultivated in Agroindustrial Wastes. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 610111.

ESTUDIO DEL EFECTO DEL CAMPO ELÉCTRICO DE ALTA INTENSIDAD SOBRE LA VIDA ÚTIL DE ARÁNDANOS AZULES (*Vaccinium* Sp)

Alondra Yemina Flores Alvarez[1], María Reyna Robles López[2], Raúl René Robles de la Torre[2]

[1]Universidad Politécnica de Tlaxcala A, [2]Instituto Politécnico Nacional CIBA-IPN.
mrobles@ipn.mx

RESUMEN

Los arándanos azules (*Vaccinium sp*.), son bayas altamente valoradas por sus propiedades nutracéuticas y sensoriales; sin embargo, son alimentos perecederos y susceptibles a contaminación microbiológica a lo largo de la cadena agroalimentaria, lo que limita su vida útil y compromete su inocuidad. Para contrarrestar esta problemática se han implementado diversas tecnologías de conservación, como la refrigeración, las atmósferas modificadas y el uso de agentes químicos; no obstante, estas pueden afectar la integridad del fruto y/o disminuir su contenido de compuestos bioactivos. Considerando lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del campo eléctrico de alta intensidad (CEAI) como tecnología no térmica, sobre parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y funcionales de arándanos frescos, los cuales están relacionados con su vida útil durante el almacenamiento.

Se aplicaron tratamientos con CEAI; a intensidades de 5 y 7.72 kV/cm durante 5, 10 y 30 minutos, con y sin aplicación de frecuencia, contando siempre con un control (sin tratamiento), cada experimento se realizó por duplicado; el mismo día posterior a los tratamientos se realizaron determinaciones de carga microbiana, capacidad antioxidante, contenido de fenoles totales, sólidos solubles totales, como valores iniciales.

Para evaluar la estabilidad los arándanos, se mantuvieron a temperatura ambiente, realizado los ensayos antes mencionados, trascurridos 8 y 15 días posteriores al tratamiento. Además, para evaluar la posible formación de poros en la superficie de los frutos se realizó una prueba de conductividad y ° Brix a las 24, 48 y 72 h después de los tratamientos. Los resultados se analizaron con las herramientas estadísticas de Excel, para la prueba Tukey se usó el programa MINITAB, para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos, con valor de $p<0.05$. Los resultados mostraron una reducción significativa de la carga microbiana en la mayoría de las condiciones del CEAI, se observaron incrementos en la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles totales, sin alterar el contenido de sólidos solubles totales y favoreciendo la estabilidad de los frutos. En algunos tratamientos se observó una ligera pérdida de peso durante el almacenamiento, lo cual podría verse como una desventaja desde el punto de vista económico, pero como oportunidad si el objetivo es la deshidratación como método de conservación. El estudio demostró que es factible incrementar la vida útil de arándanos mediante la exposición a un CEAI. El tratamiento con 7.72 kV/cm con 200 Hz durante 10 minutos puede reducir significativamente la carga microbiana y, en consecuencia, pueden ser almacenados sin refrigeración durante al menos 16 días, sin embargo, es necesario optimizar las condiciones de aplicación para maximizar sus beneficios y evitar efectos adversos sobre la calidad física de las bayas.

INTRODUCCIÓN

Los arándanos azules (*Vaccinium sp*) son bayas reconocidas por sus propiedades nutracéuticas y sensoriales. Son clasificados como comestibles de color azul o morado oscuro que presentan una película cerosa, la cual actúa como barrera protectora frente a daños mecánicos y agentes microbiológicos[1]. Los beneficios en la salud se atribuyen a su riqueza en compuestos bioactivos, especialmente polifenoles[2], así como vitaminas, pectinas, elementos minerales[3] y fibra dietética[4]. En particular, su alto contenido de antocianinas ha sido relacionado con efectos positivos en la prevención de enfermedades crónicas y en la promoción de la salud general[4] debido a su poder

antioxidante, pues mejoran el sistema inmunológico, previenen daño celular, reducen la inflamación, además de poseer propiedades antienvejecimiento[5].

Los arándanos azules son considerados alimentos perecederos, ya que presentan una alta tasa de respiración[6], lo que acelera su deterioro fisiológico y, por ende, requieren un procesamiento adecuado para facilitar su aprovechamiento en diversas formas de consumo, ya sea frescos o deshidratados, así como en presentaciones procesadas tales como puré, jugo, jalea, mermelada, compota, productos congelados tipo snack, e incluso como agente saborizante en yogures, repostería, pasteles y helados[7].

Actualmente, los métodos de conservación postcosecha convencionales para arándanos azules aún presentan determinadas limitaciones en los ámbitos ambientales, operativos o relacionados con la integridad del fruto, ya que es necesario considerar simultáneamente diversos parámetros de calidad fisicoquímicos y de operación. Tecnologías como la congelación, las atmósferas modificadas y el uso de dióxido de cloro (ClO_2) y dióxido de azufre (SO_2), entre otras, han mostrado buenos resultados; sin embargo, pueden implicar elevados costos y consumo energético, dificultades de escalamiento a nivel industrial, generación de residuos químicos y alteraciones en las propiedades fisicoquímicas del fruto[8,9,10]**.**

Las tecnologías emergentes no térmicas han surgido como alternativa para abordar las limitaciones de los procesos convencionales. Entre ellas, el campo eléctrico de alta intensidad, también conocido como campo electrostático de alto voltaje (HEVF, por sus siglas en inglés), ha demostrado ser eficaz para reducir el deterioro y preservar la inocuidad alimentaria. Las ventajas que presenta esta tecnología destacan su rentabilidad y bajo impacto ambiental[11], ya que no requiere equipo sofisticado, tiene un bajo consumo energético y no genera residuos[10]. Además, opera a presión atmosférica y temperatura ambiente, permite tiempos de tratamiento cortos y puede adaptarse a diversos entornos de procesamiento, así como a distintos tipos de productos, tanto líquidos como sólidos[12, 13].

Diversas tecnologías emergentes no térmicas han sido aplicadas para mejorar la vida útil de los arándanos, como el campo eléctrico pulsado[14] y el plasma frío[15], la aplicación del CEAI en arándanos no ha sido poco explorada. Por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del campo eléctrico sobre *Vaccinium* sp, determinando su influencia sobre parámetros físicos, la carga microbiana, la capacidad antioxidante y la concentración de compuestos fenólicos totales, con el fin de valorar su potencial como tecnología de conservación que conserve y/o mejore las cualidades funcionales del fruto.

TEORÍA

El CEAI emplea dos placas paralelas que generan un campo eléctrico estático, caracterizado por su uniformidad y mayor estabilidad en comparación con técnicas como el campo eléctrico pulsado (PEF). En esta configuración, aunque el voltaje aplicado puede ser alto, la corriente es mínima, por lo que la potencia requerida es considerada insignificante. Además, existe un equilibrio entre las cargas positivas y negativas, en consecuencia, el campo eléctrico se forma entre las dos placas y no se produce viento iónico o eléctrico[16].

El mecanismo de acción de esta tecnología aún no está completamente dilucidado, sin embargo, lo descrito principalmente en la literatura es la ionización del aire, generando especies reactivas, como la producción y liberación de ozono en la cámara de tratamiento. Este fenómeno puede disminuir la proliferación de microorganismos[17], y diversas reacciones bioquímicas en la superficie de frutas y vegetales[18]. Se ha reportado su capacidad para reducir la actividad de enzimas responsables del deterioro durante el almacenamiento, como la pectin metil esterasa[19]. Asimismo, puede favorecer la activación de sistemas de defensa antioxidante, estimulando la actividad de enzimas como la catalasa, superóxido dismutasa, ascorbato peroxidasa y peroxidasa[20], de esta manera se prolonga

la vida útil del alimento. Además, es una tecnología con aplicaciones potenciales como desodorización de aceite de girasol en su proceso de refinado[21] y la descongelación de carnes[22].

PARTE EXPERIMENTAL

Se emplearon paquetes de arándanos azules frescos (*Vaccinium* sp.) en presentaciones de 510 g, adquiridos en una tienda local del estado de Puebla, México. Los frutos presentaron un diámetro aproximado de 1.5 cm, forma esférica uniforme y coloración azul intensa homogénea (característica del estado de madurez comercial), firmes al tacto, sin evidencia de ablandamiento, jugo o crecimiento fúngico visible.

Los arándanos fueron transportados en su empaque original a temperatura ambiente y almacenados a 4 °C en refrigeración hasta sus tratamientos y análisis.

Tratamiento con campo eléctrico de alta intensidad.
Para generar el campo eléctrico, se utilizó un sistema diseñado y construido en el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN Unidad Tlaxcala). El equipo está compuesto por una fuente de alto voltaje variable regulada con una unidad de control, una cámara de tratamiento equipada con dos electrodos de acero inoxidable pulido al espejo dispuestos en configuración paralela (de 9.6 cm de diámetro), donde el electrodo superior se encuentra conectado a la fuente de voltaje y el inferior a tierra, así como un modulador de frecuencia.
Se conformaron seis grupos experimentales, cada uno integrado por 20 arándanos, descartando aquellos que mostraban daños. Las bayas fueron dispuestas en recipientes de vidrio especiales esterilizados y se colocaron en el electrodo inferir dentro de la cámara de tratamiento (Figura 1).

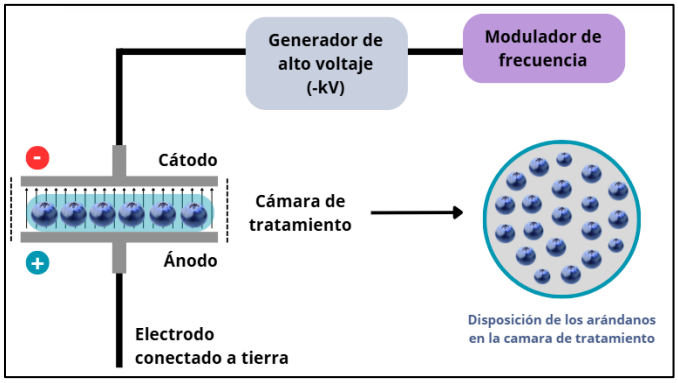


Figura 1. Tratamiento de los arándanos azules con CEAI.

Los grupos fueron enumerados del 1 al 6; la primera mitad fue expuesta a una intensidad de campo 5kV/cm (separación de los electrodos de 2.2 cm) durante 5, 10 y 30 minutos, respectivamente, con 200 Hz de frecuencia. La segunda mitad de los grupos fue tratada durante los mismos tiempos e intensidad, pero sin frecuencia. Posteriormente, se repitió este procedimiento experimental bajo las mismas condiciones, modificando únicamente la intensidad del campo eléctrico, la cual se incrementó a 7.72 kV/cm. Asimismo, se colocaron 20 arándanos en un recipiente estéril para ser usado como control en cada experimento identificado como control o sin tratamiento (ST).

Ensayo microbiológico.
Se emplearon tres medios de cultivo: papa dextrosa agar (PDA) para el aislamiento de mohos y levaduras; agar métodos estándar (ME) para el recuento total de microorganismos aerobias mesófilas; y agar eosina y azul de metileno (EMB, por sus siglas en inglés) para la detección de bacterias Gram negativas.

Se tomaron muestras de tres arándanos de cada grupo después de los tratamientos y del ST, los cuales se colocaron en tubos Falcon con 9 ml de agua peptona estéril. Las muestras fueron agitadas

en un vortex durante un minuto para favorecer la liberación de microorganismos presentes en la superficie del fruto. Posteriormente, se inocularon 100 µl de la solución obtenida en cajas Petri previamente preparadas con cada uno de los medios de cultivo. Las placas fueron incubadas a 37 °C durante 48 horas en condiciones aerobias. Una vez transcurrido el tiempo se realizó el conteo de colonias.

Porcentaje de frutos en descomposición.
A partir de grupos experimentales con 20 arándanos azules, se extrajeron ocho de ellos para los ensayos fisicoquímicos, los cuales también fueron colocados en recipientes de vidrio estériles. Los doce arándanos restantes se reservaron únicamente para su observación durante 16 días de almacenamiento sin refrigeración en el recipiente de vidrio cerrado (para evitar contaminación del medio) y de esta manera, calcular el porcentaje de fruta en mal estado al finalizar el periodo de almacenamiento mediante la siguiente fórmula [23]:

Ecuación 1 $$.\%\ \boldsymbol{defrutos\ en\ mal\ estado} = \frac{\#\ \boldsymbol{frutas\ deterioradas}}{\#\ \boldsymbol{frutas\ totales}} * \mathbf{100}$$

Preparación de muestras para la determinación de fenoles totales y capacidad antioxidante total.
Después del tratamiento, se seleccionaron aleatoriamente arándanos de cada grupo, obteniéndose un peso promedio de 2.090 ± 0.305 g. Los frutos fueron homogeneizados mecánicamente en un mortero con pistilo hasta obtener una pasta uniforme. La materia vegetal obtenida se transfirió a un frasco ámbar con tapón hermético, al cual se adicionaron 4 ml de una solución metanol:agua:etanol (MAE 6:2:2 v/v).

Las muestras se dejaron en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente, protegidas de la luz para evitar la degradación de compuestos fenólicos sensibles a la radiación. Transcurrido este tiempo, se recuperó el extracto por decantación en tubos ámbar, siendo este la muestra para los análisis posteriores.

Determinación del contenido de fenoles totales.
La cuantificación de fenoles totales se realizó mediante el método Folin–Ciocalteu. Se utilizó ácido gálico como estándar (200 mg/l), y los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramo de fruto fresco (mg EGA/g fruto fresco). Para el análisis, se transfirieron 200 µL del extracto de arándano azul a tubos Eppendorf ámbar, a los cuales se añadieron 200 µL del reactivo Folin–Ciocalteu previamente diluido en agua destilada en una proporción 1:50 (v/v). La mezcla se homogeneizó durante 10 segundos en vórtex. Posteriormente, se agregaron 400 µL de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.35 M, se homogeneizó nuevamente durante 10 segundos y se incubó en oscuridad durante 30 minutos a temperatura ambiente.

Finalizado el tiempo de incubación, se midió la absorbancia a 760 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. Como blanco, se empleó una mezcla de reactivos sin muestra, utilizando la solución MAE como base. Cada análisis se realizó en los días 0 y 8, por duplicado. Este procedimiento se aplicó a la muestra ST, así como a las muestras tratadas con CEAI.

Determinación de la capacidad antioxidante.
La capacidad antioxidante se evaluó mediante el método del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH). Para ello se preparó una solución de radical DPPH en solución MAE (solución madre 20 mg/100 ml), Esta solución se almacenó en un frasco de vidrio ámbar en refrigeración para minimizar su degradación. Para las mediciones, se utilizó una solución con una absorbancia ajustada a 1.000 mediante la adición de MAE o solución madre de DPPH, según fuera necesario. Este ajuste se realizó antes de cada ensayo para mantener la misma absorbancia inicial.

En tubos Eppendorf ámbar de 2 ml se agregaron 250 µl de una solución 1:100 (extracto correspondiente: solución MAE), seguido de la adición de 1 ml de la solución de DPPH utilizando micropipetas. La mezcla se homogeneizó en vortex durante 10 segundos y se incubó durante 30 minutos a temperatura ambiente, protegida de la luz. Finalizado el tiempo de reacción, se realizó la

lectura de absorbancia a 517 nm en un espectrofotómetro UV-Vis. Como blanco, se utilizó la solución MAE para descartar la absorbancia del solvente.

Cada análisis se realizó en los días 0 y 8, por duplicado. Este procedimiento se aplicó a la muestra control, así como a las tratadas con CEAI. La capacidad antioxidante se expresó en µmol equivalentes Trolox por gramo de fruto fresco (µmol TE/g fruto fresco). Para ello, se elaboró una curva de calibración utilizando una disolución de Trolox (2µmol /ml) como estándar.

Pérdida de peso.
Se registró el peso inicial de los grupos ST y aquellos sometidos a tratamientos con CEAI en el día 0, posteriormente se registraron los pesos en los días 3, 8 y 12. El peso perdido se expresó en porcentaje mediante la siguiente fórmula[24]:

Ecuación 2. $$\%\ \boldsymbol{Pérdida\ de\ peso} = \frac{(\boldsymbol{peso\ inicial - pesos\ final\ despues\ de\ almacenamiento})}{(\boldsymbol{peso\ inicial})} \times \mathbf{100}$$

Determinación de sólidos solubles totales y conductividad.
A partir de los arándanos destinados a los ensayos fisicoquímicos, se colocó la pulpa de dos arándanos por grupo experimental en un refractómetro portátil. Esta lectura se realizó únicamente en el día 0 (después de los tratamientos), para detectar un posible efecto inmediato.
Por otro lado, se seleccionaron dos arándanos por cada grupo experimental y fueron colocados en 30 ml de agua destilada, posteriormente la conductividad fue medida utilizando un conductímetro a las 24h, 48h y 72h después de los tratamientos a temperatura ambiente.

Análisis de datos.
Se realizó el análisis de varianza en Excel. Posteriormente, se utilizó la prueba Tukey (diferencias significativas honestas) en MINITAB para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. Los valores medios se consideraron significativamente diferentes con un valor $p<0.05$.

RESULTADOS

Ensayo microbiológico.
Los frutos adquiridos en un centro comercial, comúnmente se comercializan empacados y sin información sobre posibles pretratamientos. Esto podría generar incertidumbre respecto al nivel real de contaminación inicial. Respecto a la evaluación de la eficacia del campo eléctrico en los ensayos microbiológicos realizados a 5 kV/cm, incluso el grupo ST no presentó crecimiento microbiano en ninguno de los tres medios utilizados, por lo que los resultados de UFC log/g de muestra para esta intensidad de campo fueron descartados.

Los ensayos se dirigieron a los tratamientos con 7.72 kV/cm, a partir de un nuevo paquete de arándanos frescos y diferente proveedor (Tabla 1). Las muestras ST, mostraron crecimiento microbiano evidente. El recuento total de microorganismos mesófilos aerobios (MMA), mohos y levaduras (ML) fue de 3,95 y 3.45 UFC log/g de fruto fresco, respectivamente. Por el contrario, no se registró crecimiento en el medio EMB, lo que indica una adecuada calidad sanitaria del producto.

Tabla 9. Recuento en placa de los grupos tratados bajo 7.72 kV/cm.

Tratamiento (minutos, kV/cm, Hertz)	Métodos estándar (UFC log/g)	Papa dextrosa agar (UFC log/g)	Agar eosina y azul de metileno (UFC log/g)
(0,0,0) Control (ST)	3.95	3.45	SC
(5,7.72,0)	SC	SC	SC
(10,7.72,0)	4.03	4.04	4.18
(30,7.72,0)	SC	SC	SC
(5,7.72,200)	SC	SC	SC
(10,7.72,200)	SC	SC	SC

(30,7.72,200)	SC	SC	SC

Nota: SC sin crecimiento

El CEAI redujo eficazmente la carga microbiana en la mayoría de los tratamientos bajo 7.72 kV/cm. La reducción del crecimiento microbiano inmediata generalmente se relaciona con la interacción de las especies reactivas de oxígeno con las membranas celulares de los microorganismos, incluyendo la desnaturalización de las proteínas microbianas, trastornos metabólicos fisiológicos e incluso desestabilización del potencial de la membrana[25] (Liu et al., 2024). Otros mecanismos descritos sugieren que, a nivel molecular, las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno dañan la estructura ADN al oxidar la guanina[26].

Por otro lado, se presentó una excepción con el grupo expuesto a 7.72 kV/cm durante 10 minutos y sin frecuencia. En este caso, el recuento total para MMA y ML fue de 4.03 y 4.04 UFC log/g de fruto fresco, respectivamente. Además, en el medio EMB el recuento de bacterias fue de 4.18 UFC log/g de fruto fresco. Esto indica que se favoreció la proliferación de microorganismos bajo estas condiciones. Este hallazgo posiblemente está relacionado con cambios en la diversidad microbiana presentes en las superficies expuestas al ozono y demás especies reactivas de oxígeno. A diferencia de los microorganismos cuyo crecimiento fue inhibido, podrían tener mecanismos de resistencia como enzimas antioxidantes o la producción de biofilms que les permitió sobrevivir al tratamiento del campo eléctrico [27].

Porcentaje de frutos en descomposición.
Los arándanos en mal estado presentaron crecimiento fúngico, arrugas evidentes en la superficie del fruto y fuga de líquido sobre el papel absorbente (Tabla 2). El porcentaje de frutas en mal estado se mantuvo dentro de un rango comprendido entre 8.3% y 25% al final del periodo de almacenamiento evaluado, siendo el grupo control y el tratamiento aplicado durante 30 minutos a 5kV/cm sin frecuencia, los que presentaron el mayor porcentaje (Tabla 3).

En contraste, los grupos tratados bajo 5 kV/cm con 200 Hz durante 5 y 10 minutos únicamente mostraron deshidratación en el día 16. Este comportamiento fue similar para el grupo tratado a 7.72 kV/cm con 200 Hz durante 10 min.

Tabla 2. Tratamientos de 7.72 kV/cm y 200 Hz.

DÍAS	0	4	8	12	16
CONTROL					
5 MIN					
10 MIN					
30 MIN					

Tabla 3. Porcentaje de deterioro en los grupos experimentales.

Tratamiento (min, kV/cm, Hz)	% de deterioro al día 16		Tratamiento (min, kV/cm, Hz)	% de deterioro al día 16
(0,0,0) ST	25		(0,0,0) ST	25
(5,5,0)	16.7		(5,7.72,0)	8.3
(10,5,0)	8.3		(10,7.72,0)	8.3
(30,5,0)	25		(30,7.72,0)	16.7
(5,5,200)	16.7		(5,7.72,200)	9.1
(10,5,200)	NV		(10,7.72,200)	NV
(30,5,200)	NV		(30,7.72,200)	18.18

Nota: NV No visible, los arándanos no presentaron deterioro durante el periodo estudiado.

La persistencia de hongos durante el almacenamiento de los arándanos, incluso después de la aplicación del tratamiento, podría indicar que el CEAI presenta una mayor eficacia sobre bacterias que para hongos, pudiendo deberse a la estructura de la pared celular de estos últimos, o bien, por la presencia de esporas. Sin embargo, prolongar el tratamiento a 30 minutos redujo visiblemente la descomposición de arándanos. La inhibición del crecimiento microbiano observada en el experimento contribuye a disminuir la tasa de descomposición de la fruta y, por ende, la vida de anaquel puede prolongarse[26]. Señalando que todo el diseño experimental se realizo sin refrigeración para acelerar el posible daño microbiano.

Determinación del contenido de fenoles totales.
El contenido de fenoles totales se mantuvo estable tras la aplicación de CAEI con una intensidad de 5 kV/cm (Figura 2). En comparación con el control (57.37 mg EAG/g de fruto fresco), el contenido de compuestos fenólicos no fue significativamente diferente respecto a los tratamientos de 5, 10 y 30 ($p>0.05$). De manera similar, la aplicación de frecuencia tampoco generó cambios significativos, ya que los tratamientos sin frecuencia presentaron en promedio 3.67 mg EAG/g de fruto fresco más que los grupos tratados a 200 Hz, cuyo contenido fue de 58.51 mg EAG/g de fruto fresco ($p>0.05$). Estos resultados sugieren que, bajo estas condiciones, si bien el contenido de compuestos bioactivos no mejora, tampoco se degrada.

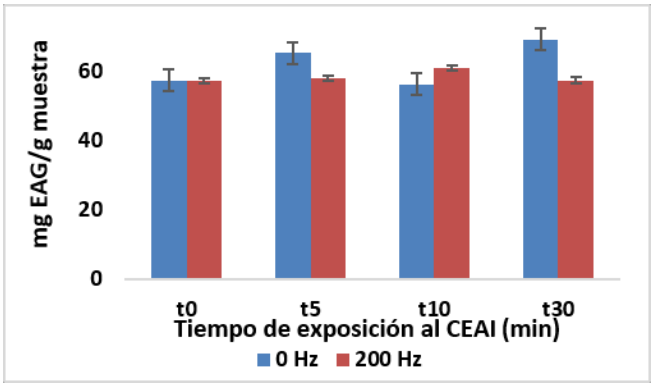


Figura 2. Contenido de fenoles totales en los grupos experimentales en el día 0 a una intensidad de 5 kV/cm

Al incrementar la intensidad de campo a 7.72 kV/cm, se observaron diferencias significativas en el contenido de fenoles totales, asociadas principalmente a la duración del tratamiento. Los tiempos de 5, 10 y 30 minutos superaron al control en contenido promedio en 9.28, 10.49 y 8.05 mg EAG/g de

fruto fresco, respectivamente (Figura 3). Por otro lado, la aplicación de frecuencia también mostró influencia sobre el contenido de fenoles totales, ya que los grupos tratados con 200 Hz presentaron en promedio 62.54 mg EAG/g de fruto fresco, mientras que aquellos tratados sin frecuencia registraron un contenido promedio de 66.12 mg EAG/g de fruto fresco. La información anterior sugiere que, a una mayor intensidad de campo eléctrico, son más favorable los tiempos intermedios y volver a evaluar los Hz necesarios.

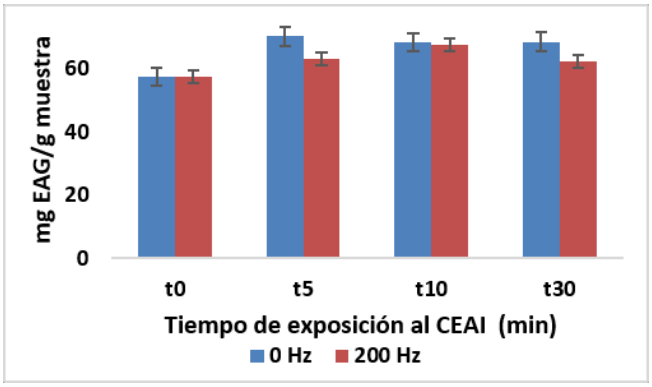


Figura 3. Contenido de fenoles totales en los grupos experimentales en el día 0 a una intensidad de 7.72 kV/cm, con tiempos de tratamiento de 0, 5, 10 y 30 min, (t0, t5, t10, t30)

Este comportamiento estaría relacionado con los mecanismos de defensa ante el estrés oxidativo del tratamiento[28] que favorecen el contenido de compuestos antioxidantes en arándanos. Estudios realizados en granadas tratadas con campo electrostático de alto voltaje se ha reportado que al aumentar la intensidad del campo eléctrico los frutos tienden a protegerse mediante una mayor síntesis de contenido fenólico, a partir de la enzima fenilalanina amoníaco liasa[29].

Posteriormente, en el octavo día de almacenamiento se observó un incremento general en el contenido de fenoles totales tanto en los grupos experimentales tratados con 5 y 7.72 kV/cm, como en el control. No obstante, estadísticamente las diferencias no pueden ser asociadas a los tiempos de tratamiento o a la frecuencia, ya que no fueron significativas respecto al control. Mas bien, los incrementos en este tipo de compuestos son resultado de los procesos fisiológicos del fruto durante la maduración[30]. En otros estudios se ha reportado el tratamiento de tomates con campo electrostático de alto voltaje no genera efectos inmediatos en el contenido de fenoles totales, pero sí retrasa su decremento durante el almacenamiento, lo cual asocian con procesos de maduración, la unión fenol–proteína y otros cambios estructurales químicos[24].

Determinación de la capacidad antioxidante.
En este estudio, la aplicación de CEAI influyó significativamente en la capacidad antioxidante de los arándanos ($p<0.05$). En el día cero, el grupo control presentó 51.87 µmol TE/g fruto fresco mientras que los grupos tratados durante 5 minutos a 5 kV/cm lo superaron por 7.34 µmol TE/g fruto fresco (Figura 4). No obstante, al prolongar el tiempo de exposición a 10 y 30 minutos, la capacidad antioxidante fue menor en 5.75 y 3.76 µmol TE/g de fruto fresco, respectivamente, en comparación con el control. Aunque en el caso del tratamiento de 30 minutos, la diferencia no fue significativa ($p>0.05$). Lo anterior sugiere que, bajo una intensidad de campo eléctrico moderada, tiempos de exposición cortos pueden inducir una respuesta antioxidante favorable en arándanos, mientras que tiempos prolongados podrían generar un estrés oxidativo contraproducente.

En cuanto a la aplicación frecuencia, los grupos en los que este factor fue omitido presentaron diferencias significativas mayores de hasta 3.5 µmol TE/g fruto fresco respecto a aquellos expuestos a 200Hz (49.58 µmol TE/g fruto fresco). Este comportamiento indica que el efecto de la frecuencia puede ser secundario a una intensidad de 5kV/cm.

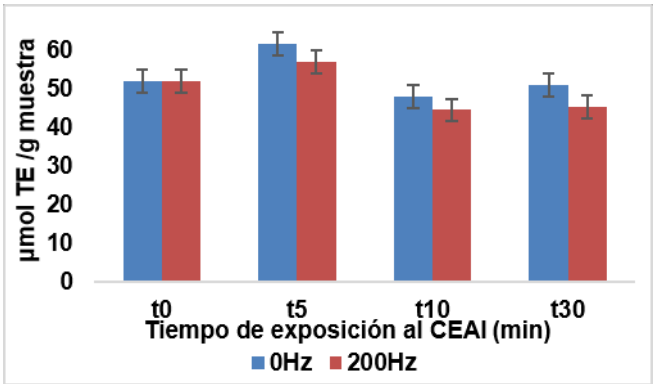


Figura 4. Capacidad antioxidante de los grupos experimentales en el día 0 a una intensidad de 5 kV/cm

Estas observaciones señalan una regulación del sistema antioxidante de los arándanos ante el estrés oxidativo inducido por las especies reactivas de oxígeno (ROS) durante la exposición al campo eléctrico, así como en procesos metabólicos del fruto. En frutos como el azufaifo o jojote (*Huping jujube*), la exposición a un campo electrostático puede favorecer la retención del contenido de ácido ascórbico y fenoles totales, así como la actividad de enzimas antioxidantes, entre ellas la superóxido dismutasa, la catalasa y la enzima ascorbato peroxidasa, contribuyendo a la mejora de la capacidad antioxidante de la fruta[31].

Por otro lado, incrementar la intensidad del campo a 7.72 kV/cm (Figura 5), únicamente el tratamiento de 10 minutos presentó un incremento significativo de 10.76 µmol TE/g fruto fresco ($p<0.05$). Mientras que los tiempos 5 y 30 minutos presentaron disminuciones en la capacidad antioxidante, aunque no significativas ($p>0.05$). Estos resultados demuestran que existe una interacción entre la intensidad aplicada y el tiempo de exposición, en la que los tiempos prolongados pueden inducir mayor oxidación del fruto. A diferencia de lo observado a 5 kV/cm, a 7.72 kV/cm los tratamientos con 200 Hz presentaron en promedio 5.45 µmol TE/g de fruto fresco más que los tratamientos sin frecuencia ($p<0.05$), por lo que la frecuencia podría ser un factor determinante a intensidades de campo eléctrico superiores.

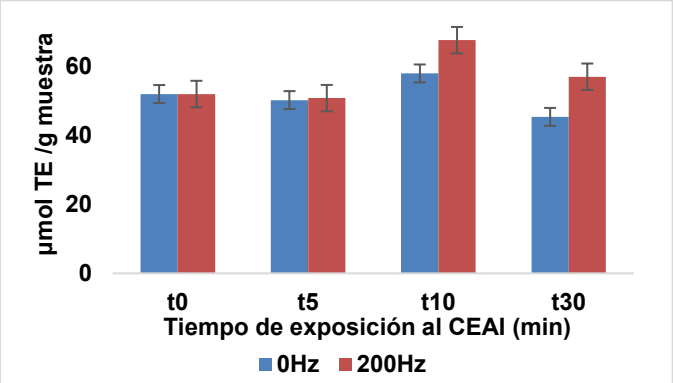


Figura 5. Capacidad antioxidante de los grupos experimentales en el día 0 a una intensidad de 7.72 kV/cm

Posteriormente, en el octavo día de almacenamiento, se registró un incremento general en la capacidad antioxidante, tanto en el control como en los grupos tratados bajo 5 y 7.72 kV/cm de intensidad. Sin embargo, las diferencias entre ellos no fueron estadísticamente significativas ($p>0.05$), por ende, los incrementos en la capacidad antioxidante no pueden ser atribuidos a los tratamientos con campo eléctrico o algún factor relacionado (tiempo o frecuencia).

Esta información sugiere que el CEAI en este estudio tiene una menor participación en la regulación del incremento progresivo de la capacidad antioxidante de los arándanos durante su proceso fisiológico de maduración. En este último, el contenido de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) experimenta cambios dinámicos que involucran tanto su producción como su eliminación. Generalmente, los niveles de ROS tienden a aumentar progresivamente hasta alcanzar un punto máximo en etapas tempranas o intermedias de maduración, y posteriormente, disminuyen. Para mitigar el daño oxidativo, el fruto responde mediante la activación de los sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos[32].

Pérdida de peso.
Se registró una pérdida progresiva de peso en todos los grupos experimentales tanto para 5 kV/cm (Tabla 4) como 7.72 kV/cm (Tabla 5). A pesar de que se observaron ligeras variaciones, el tratamiento con CEAI no indujo cambios importantes sobre este parámetro relacionados con el tiempo de exposición o la frecuencia aplicada ($p>0.05$). Lo observado está más relacionado directamente con mecanismos fisiológicos del fruto, como la transpiración, la respiración y el gradiente de potencial hídrico entre el tejido vegetal y el ambiente de almacenamiento[33].

Tabla 4. Pérdida de peso promedio de los grupos tratados bajo 5 kV/cm.

		Porcentaje final de pérdida de peso		
Día		**3**	**8**	**12**
Tiempo (min)	0	7.50	17.30	21.72
	5	6.97	17.94	**23.46**
	10	6.97	17.40	22.53
	30	6.05	15.62	21.08
Frecuencia (Hz)	0	7.50	18.16	**23.44**
	200	6.24	15.97	20.95

Tabla 5. Pérdida de peso promedio de los grupos tratados bajo 7.72 kV/cm.

		Porcentaje final de pérdida de peso		
Día		**3**	**8**	**12**
Tiempo (min)	0	7.50	17.30	21.72
	5	7.83	17.12	21.46
	10	5.98	16.19	21.09
	30	7.71	17.79	**22.53**
Frecuencia (Hz)	0	6.62	16.20	20.70
	200	7.89	18.01	**22.70**

Cabe destacar los hallazgos en el día 12. A pesar de que no se encontraron diferencias significativas, los grupos tratados con 5 kV/cm presentaron mayores pérdidas de peso (0.49%) en comparación con aquellos expuestos a 7.72 kV/cm. Por lo que se deduce que la frecuencia no influyó en este parámetro, ya que no indujo cambios significativos ($p>0$-05). Tras la aplicación de campos electrostáticos ocurre una disminución en la apertura estomática epidérmica, lo cual permite explicar la menor perdida de peso[25]. En estudios sobre hongos (*Agaricus bisporus*), se ha demostraron que la aplicación HVEF retrasa el aumento de la tasa de pérdida de peso, ya que este disminuye la actividad respiratoria [18].

Además, en el día 12 de almacenamiento, los grupos tratados durante 5 y 10 minutos a una intensidad de 5 kV/cm tuvieron una pérdida promedio de peso mayor que el control (21.72%) de 1.74 y 0.81%, respectivamente. Mientras que el grupo tratado durante 30 minutos conservó un 0.64% más que el grupo control. Por otro lado, los grupos tratados bajo 200 Hz experimentaron una pérdida de peso menor que los grupos sin frecuencia, con una diferencia del 2.49%. Por tanto, si el propósito es conservar el peso del fruto, bajo 5kV/cm es necesario un tiempo mayor y regular el estímulo eléctrico para lograrlo.

Comparado con los grupos tratados bajo 7.72kV/cm, el control presentó un porcentaje de pérdida de peso superior al de los tratamientos de 5 y 10 min, con una ligera diferencia promedio de 0.25 y 0.65%, respectivamente. En contraste, los grupos tratados durante 30 minutos presentaron una pequeña pérdida promedio de 0.82% superior al control. En cuanto a la frecuencia, la aplicación de 200 Hz ocasionó un mayor porcentaje de pérdida de peso (2%) en comparación con los grupos en los que esta condición fue omitida ($p>0.05$). Esto sugiere que al incrementar la intensidad del campo eléctrico son necesarios tiempos moderados y volver a evaluar los Hz para conservar la humedad interna del fruto, relacionada con el peso.

Contenido de sólidos solubles totales.
El tratamiento con CEAI no mostró efectos importantes sobre los sólidos solubles totales de arándanos, ya que no se encontraron diferencias significativas ($p>0.05$) entre los grupos experimentales asociadas al tiempo de tratamiento, frecuencia o intensidad de campo. Las ligeras variaciones observadas pueden atribuirse a diferencias en el estado de madurez de los arándanos (Figura 6).

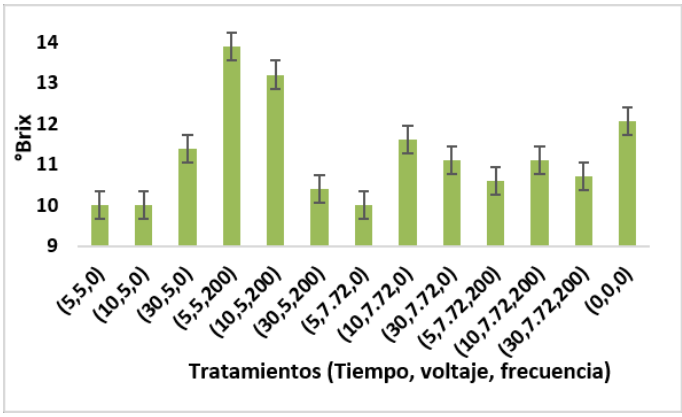


Figura 6. Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) en los grupos experimentales (min, kV/cm, Hz).

De manera general, los grupos tratados con la intensidad de 7.72 kV/cm presentaron menos concentración de solidos solubles que aquellos tratados con 5 kV/cm, los cuales registraron en promedio 13.9 °Bx. En cuanto a los tiempos, el grupo control presentó 12.07°Bx, y los menores valores fueron con los tratamientos (5min,5kV/cm,0Hz), (10min,5kV/cm,0Hz), (10min,5kV/cm,200 HZ), y (5 min, 7kV/cm, 0 Hz) con valores de 10°Bx. Es posible que las diferencias en la concentración de solidos disueltos esté relacionada a dos factores, que es la maduración de los frutos y la concentración de estos a causa de la deshidratación. Estos análisis se realizaron inmediatamente después de los tratamientos por lo que existe una posibilidad de que las diferencias entre los grupos tratados y el control serían más evidentes en días posteriores de almacenamiento, ya que esta tecnología reduce la tasa de respiración y, por ende, otros procesos metabólicos como la conversión del almidón en azúcar, conservando el contenido de SST por mayor tiempo[28].

Conductividad.
Este parámetro fue medido para evaluar el posible daño en la epidermis de los arándanos causado por el CEAI, donde una conductividad mayor implicaría la formación de poros o ruptura que permita la salida de componentes del fruto, sin embargo no se detectó una permeabilización severa, ya que

los grupos tratados presentaron valores menores en comparación con los valores del control ($p<0.05$) en los tres tiempos evaluados (figura 7), se observa que el factor con mayor efecto sobre este parámetro fue el tiempo de exposición. Los datos mostraron que la conductividad disminuye significativamente ($p<0.05$) conforme se prolonga el tiempo de tratamiento. Esta tendencia se mantuvo en los tres tiempos evaluados. El voltaje y la frecuencia influyen de manera secundaria bajo las condiciones evaluadas.

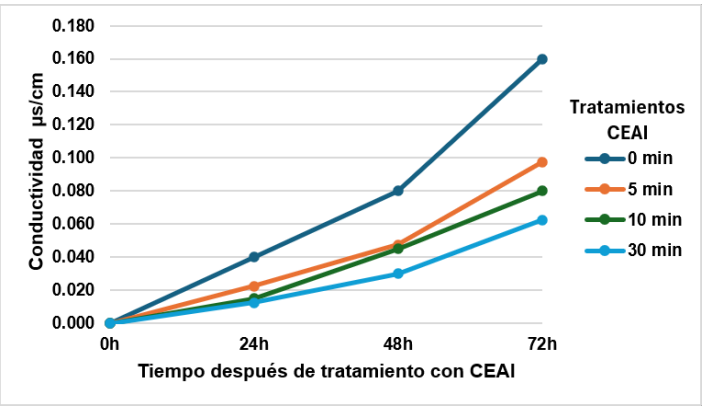


Figura 7. Conductividad después del tratamiento con CEAI.

Estos resultados ofrecen información sobre la integridad celular de los arándanos, ya que un incremento en sus valores se asocia con daños en la membrana celular, lo que favorece la permeabilización y la fuga de electrolitos intracelulares hacia el medio externo[23]. El tratamiento con CEAI disminuye dicha fuga, indicando estabilidad de la membrana celular, además esta estabilidad de la membrana podría estar relacionada con la firmeza del fruto debida a una posible disminución de la actividad enzimática.

CONCLUSIONES

Es factible mejorar la vida útil de diversos frutos climatéricos, así como se demostró con este trabajo donde la vida útil de arándanos azules (*Vaccinium* sp.) expuestos a un campo eléctrico (CEAI), se incrementó sin perder las características fisicoquímicas y nutraceúticas de las bayas.

El tratamiento a 7.72 kV/cm con 200 Hz durante 10 minutos redujo significativamente la carga microbiana y, por ende, el porcentaje de descomposición de los arándanos durante 16 días sin refrigeración.

Bajo la combinación de las variables controlables del equipo de CEAI, (intensidad de campo y tiempo de exposición y frecuencia), es posible incrementar la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles totales sin comprometer el contenido de sólidos solubles totales y, a su vez, favorecer la estabilidad de la membrana celular.

Aunque determinados tratamientos a 5 o 7.72 kV/cm indujeron una ligera mayor pérdida de peso durante el almacenamiento, este hallazgo representa oportunidad para investigar su aplicación como pretratamiento en procesos como la deshidratación.

Se sugiere complementar estos experimentos considerando el control de condiciones ambientales, como la humedad relativa y la temperatura de almacenamiento, así como la optimización de los tiempos de tratamiento, la intensidad de campo y la frecuencia; considerando que cada matriz alimentaria es diferente.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. A. Cleves-Leguízamo, “Generalidades del cultivo de arándano (*Vaccinium corymbosum* L)¨, en *Fundamentos técnicos del cultivo del arándano* (*Vaccinium corymbosum* L.) en la región central de Colombia (Editorial UPTC, Tunja, Boyacá, 2021) Capítulo 2, pp. 19-30.
2. M. Gutiérrez Rodas, “Efecto de la actividad antioxidante en una conserva de arándanos”, Polo del Conocimiento, Vol. 7, 11, 2022, pp. 1243-1263.
3. J. Chen, X.-Y. Tao, A.-D. Sun, Y. Wang, X.-J. Liao, L.-N. Li, & S. Zhang, “Influence of pulsed electric field and thermal treatments on the quality of blueberry juice”, International Journal of Food Properties, Vol. 17, 7, 2014, pp. 1419-1427.
4. W. Kalt, A. Cassidy, L. R. Howard, R. Krikorian, A. J. Stull, F. Tremblay, & R. Zamora-Ros, “Recent research on the health benefits of blueberries and their anthocyanins”. Advances in Nutrition, Vol. 11, 2, 2020, pp. 224-236.
5. M. E. Cervantes-Valencia, N. López-Valdez, M. Rojas-Lemus, A. González-Villalva, G. Morales-Ricardes, P. Bizarro-Nevares, M. Uscarroz-Cano, J. Á. Salgado-Hernández, S. Mendoza-Martínez, L. M. Lamas-Orozco, & T. I. Fortoul, “Antioxidantes naturales y su efecto contra el estrés oxidante provocado por la contaminación por material particulado”, Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM, Vol. 67, 4, 2024, pp. 7-20.
6. D. Antoniciello, P. Limosani, G. Massenzio, R. Caporizzi, & L. de Palma, “Effect of cold plasma treatments on quality attributes of raspberry homogenate intended for sustainable processed products in marginal lands”, Horticulture International Journal, Vol. 9, 3, 2025, pp. 100-102.
7. M. P. Zia & I. Alibas, “Influence of the drying methods on color, vitamin C, anthocyanin, phenolic compounds, antioxidant activity, and in vitro bioaccessibility of blueberry fruits”, Food Bioscience, Vol. 42, 2021, 101179.
8. L. Pérez-Lavalle, E. Carrasco & A. Valero, “Strategies for Microbial Decontamination of Fresh Blueberries and Derived Products”, Foods, Vol. 9, 11, 2020, 1558.
9. J. Rodríguez & J. P. Zoffoli, “Effect of sulfur dioxide and modified atmosphere packaging on blueberry postharvest quality”, Postharvest Biology and Technology, Vol. 117, 2016, pp. 230-238.
10. C.-E. Liu, W.-J. Chen, C.-K. Chang, P.-H. Li, P.-L. Lu & C.-W. Hsieh, “Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf life of persimmons (*Diospyros kaki*)” LWT - Food Science and Technology, Vol. 75, 2017, pp. 236-242.
11. X. Chang, Y. Chang, X. Y. Chang, X. Cheng, L. Li & Y. Wang, “Widely targeted metabolomics analysis reveals that the combined treatment of acidic electrolyzed water and a high-voltage electrostatic field maintain the storage quality of Huping jujube fruits”, LWT - Food Science and Technology, Vol. 219, 2025, 117521.
12. N. Yawut, T. Mekwilai, N. Vichiansan, S. Braspaiboon, K. Leksakul & D. Boonyawan, “Cold plasma technology: Transforming food processing for safety and sustainability”, Journal of Agriculture and Food Research, Vol. 18, 2024, 101383.
13. W.-L. Zhu, C.-K. Chang, S.-Y. Tsai, M. Gavahian, S. P. Santoso & C.-W. Hsieh, “High voltage electric field as a green technology preserves the appearance of apple juice during cold storage”, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Vol. 41, 2024, 101676.
14. T. Z. Jin, Y. Yu & J. B. Gurtler, “Effects of pulsed electric field processing on microbial survival, quality change and nutritional characteristics of blueberries”, LWT - Food Science and Technology, Vol. 77, 2017, pp. 517-524
15. C. Zhang & J.H. Cheng, “Assessing the Effect of Cold Plasma on the Softening of Postharvest Blueberries through Reactive Oxygen Species Metabolism Using Transcriptomic Analysis”, Foods, Vol. 13, 7, 2024, 1132.
16. M. Dalvi-Isfahan, M. Havet, N. Hamdami & A. Le-Bail, “Recent advances of high voltage electric field technology and its application in food processing: A review with a focus on corona discharge and static electric field”, Journal of Food Engineering, Vol. 353, 2023, 111551.
17. G. Atungulu, Y. Nishiyama & S. Koide, “Respiration and climacteric patterns of apples treated with continuous and intermittent direct current electric field”, Journal of Food Engineering, Vol. 63, 1, 2004, pp. 1-8.
18. B. Deng, C. Jia, W. Jia, Y. Li, M. Chang & H. Zhang, “Mechanism of High-Voltage Electrostatic Field Treatment in Maintaining the Postharvest Quality of *Agaricus bisporus*”. Horticulturae, Vol. 11, 9, 2025, 1129.

19. J. I. Valdez-Miranda, M. R. Robles-López, R. R. Robles-de-la-Torre, L. Alamilla-Beltrán, H. Hernández-Sánchez & G. F. Gutiérrez-López, “Effect of high-voltage electrostatic field treatments on bananas (Musa paradisiaca var. sapientum) on their postharvest quality, enzymatic activity and morphological changes” Food and Bioproducts Processing, Vol. 146, 2024, pp. 135-146.
20. R. Zhao, J. Hao, J. Xue, H. Liu & L. Li, “Effect of high-voltage electrostatic field pretreatment on the antioxidant system in stored green mature tomatoes”. Journal of the Science of Food and Agriculture, Vol. 91, 9, 2011, pp. 1680-1686.
21. Tavakoli, M. A. Sahari, M. Barzegar, H. Ahmadi Gavlighi, S. Marzocchi, S. Marziali & M. Caboni, “Deodorization of sunflower oil by high voltage electric field as a nonthermal method sunflower oil refining by electric field”. Journal of Food Science, Vol. 87, 10, 2022, pp. 4363-4378.
22. E. Movahedi, M. Sadeghi, A. A. Masoumi & N. Hamdami, “A continuous high voltage electrostatic field system for thawing food materials. Journal of Agricultural Engineering, Vol 52, 2, 2021, 1163.
23. S. Zhao, J. Liu, H. Jiang, X. Yang, W. Guan, B. Liu, Z. Lv & C. Chen, “Study on electrostatic field assisted freezing temperature storage of grapes” Journal of Food Engineering, Vol. 394, 2025, 112527.
24. X. Nie, Z. Zuo, L. Zhou, Z. Gao, L. Cheng, X. Wang, L. Nie & P.-H. Huang, “Investigating the Effect of High-Voltage Electrostatic Field (HVEF) Treatment on the Physicochemical Characteristics, Bioactive Substances Content, and Shelf Life of Tomatoes”, Foods, Vol. 13, 17, 2024, 2823.
25. Y. Liu, L. Zhang, T. Hu, Q. Liu, S. Zhou, Y. Zhao, A.-N. Jatt, C. Zhang & H. Gong, “A New Strategy for Enhancing Postharvest Quality of Sweet Cherry: High-Voltage Electrostatic Field Improves the Physicochemical Properties and Fungal Community”, Foods, Vol, 13, 22, 2024, 3670.
26. X. Y. Dong & Y. L. Yang, ”A novel approach to enhance blueberry quality during storage using cold plasma at atmospheric air pressure”, Food and Bioprocess Technology, Vol. 12, 2019, pp, 1409-1421.
27. L. A. Yanclo, A. Vorster, C. Van Heerden, G. Sigge, Z. A. Belay & O. J. Caleb, “Mapping the microbial diversity associated with mango fruit during postharvest handling, cold plasma treatment, storage and after drying”, Applied Food Research, Vol. 5, 2, 2025, 101101.
28. Y. C. Huang, Y. H. Yang, K. Sridhar & P.-J. Tsai, “Synergies of modified atmosphere packaging and high-voltage electrostatic field to extend the shelf-life of fresh-cut cabbage and baby corn”, LWT - Journal of Food Science and Technology, Vol. 138, 2021, 110559.
29. M. Lotfi, N. Hamdami, M. Dalvi-Isfahan & S. Fallah-Joshaqani, “Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit”. Innovative Food Science and Emerging Technologies, Vol. 75, 2022, 102888.
30. Eichholz, S. Huyskens-Keil & S. Rohn, “Blueberry phenolic compounds: Fruit maturation, ripening and post-harvest effects”, in *Processing and impact on active components in food* (Academic Press, 2015), Chapter 21, pp. 173-180.
31. X. Chang, Y. Liang, T. Guo, Y. Wang & J. Yang, “Combined Treatment of Acidic Electrolyzed Water and High-Voltage Electrostatic Field Improves the Storage Quality of Huping Jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Huping)”, Foods, Vol. 12, 14, 2023, 2762.
32. W. Wei, Z. Liu, X. Pan, T. Yang, C. An, Y. Wang, L. Li, W. Liao & C. Wang, ”Effects of reactive oxygen species on fruit ripening and postharvest fruit quality”. Plant Science, Vol. 352, 2025, 112391.
33. R. Luft, A. Ambaw & U. L. Opara, “Mechanisms and modelling approaches to weight loss in fresh fruit: A review”, Technology in Horticulture, Vol. 4, 2024, e006.

DESARROLLO Y EVALUACIÓN SENSORIAL DE GOMITAS FUNCIONALES ELABORADAS CON EXTRACTOS FOLIARES DE *Passiflora Edulis* COMO ESTRATEGIA DE VALORIZACIÓN AGROINDUSTRIAL

Brenda Elizabeth Pitones Velázquez , Héctor Emmanuel Valtierra Marín , Laura Elvira Valencia Adame, Lucía Delgadillo Ruíz , Claudia Herminia Maldonado Tapia , Eva María López Valerio y Juan Carlos López Ramírez

Universidad Autónoma de Zacatecas

RESUMEN

En el ámbito agronómico, el aprovechamiento de especies de interés agroalimentario representa una estrategia para incrementar el valor agregado de los sistemas productivos. *Passiflora edulis*, además de su importancia frutícola, ofrece potencial para la valorización de biomasa foliar como fuente de compuestos bioactivos, lo que favorece el desarrollo de ingredientes funcionales y la diversificación de productos agroindustriales orientados al bienestar. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del método de obtención del extracto y del tipo de gelificante en la aceptación sensorial de gomitas funcionales formuladas con extractos de hojas de *Passiflora edulis*, en el marco del aprovechamiento agroindustrial de biomasa foliar con potencial funcional. Para lo anterior, se empleó un diseño factorial 3 × 3 con tres métodos de obtención del extracto foliar (infusión, hidrolato e hidroetanólico) y tres tipos de gelificantes (grenetina, pectina y agar-agar). Las gomitas se elaboraron bajo condiciones estandarizadas, incorporando una concentración uniforme del extracto vegetal. La evaluación sensorial se realizó mediante una prueba hedónica de 9 puntos con 40 panelistas no entrenados, quienes calificaron aroma, sabor, dulzor, color, sensación en boca, aceptación general e intención de consumo. Los datos se analizaron estadísticamente para identificar diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Los resultados muestran diferencias significativas, destacando la formulación con extracto hidroetanólico y pectina, que presentó la mayor aceptación general (7.8 ± 0.6) por su mejor balance de sabor y dulzor, mientras que la combinación hidrolato–agar-agar mostró la menor aceptación (5.3 ± 1.0). La mayoría de los panelistas manifestó disposición de consumo regular para las formulaciones mejor evaluadas. Por lo que se concluye que el método de obtención del extracto y el tipo de gelificante influyeron significativamente en la aceptación sensorial, y la combinación hidroetanólico–pectina se posicionó como la alternativa más prometedora para valorizar biomasa foliar de *Passiflora edulis* en productos funcionales con valor agregado.

INTRODUCCION

La agroindustria desempeña un papel estratégico en el fortalecimiento de los sistemas agrícolas modernos, debido a su capacidad para transformar materias primas en productos con mayor valor agregado, favoreciendo la rentabilidad económica, la sostenibilidad y la diversificación productiva del sector agrícola. En los últimos años, el aprovechamiento integral de los cultivos ha adquirido gran relevancia dentro de los modelos de economía circular y sostenibilidad agroalimentaria, donde los residuos y subproductos agrícolas son considerados fuentes potenciales de compuestos bioactivos y materias primas funcionales con aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (FAO, 2019; Weyya et al., 2024). En este contexto, la valorización de biomasa vegetal residual representa una estrategia innovadora orientada a disminuir el impacto ambiental generado por los residuos agrícolas y, al mismo tiempo, incrementar el valor económico de los sistemas productivos. Diversos estudios han demostrado que estructuras vegetales tradicionalmente desaprovechadas, como hojas, tallos, semillas y cáscaras, contienen metabolitos secundarios con propiedades funcionales relevantes, incluyendo actividad antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria y ansiolítica, lo que ha impulsado su incorporación en el desarrollo de alimentos funcionales y nutracéuticos (Granato et al., 2020; Weyya et al., 2024).

Entre las especies tropicales con mayor interés agroindustrial destaca *Passiflora edulis*, comúnmente conocida como maracuyá o pasiflora, cultivo ampliamente distribuido en regiones tropicales y subtropicales debido a la aceptación comercial y nutricional de su fruto. Esta especie presenta una alta importancia económica en diversos países productores, ya que su fruto es utilizado en la elaboración de jugos, néctares, concentrados, postres y otros productos procesados. Además, *Passiflora edulis* posee características fisicoquímicas y sensoriales altamente apreciadas por los consumidores, incluyendo sabor exótico, aroma característico y contenido significativo de vitaminas, minerales y compuestos fenólicos (He et al., 2020; Ramaiya et al., 2019). Aunque el aprovechamiento agroindustrial del fruto ha sido ampliamente estudiado, investigaciones recientes han demostrado que otras partes de la planta, particularmente las hojas, poseen un elevado contenido de compuestos fitoquímicos con potencial funcional y farmacológico. Entre los metabolitos secundarios identificados destacan flavonoides, alcaloides y compuestos fenólicos, los cuales han sido asociados con actividades antioxidantes, antiinflamatorias, antidiabéticas y ansiolíticas (He et al., 2020; Salles et al., 2020). Asimismo, estudios in vitro e in vivo han evidenciado que los extractos foliares de *Passiflora edulis* presentan una importante capacidad antioxidante, atribuida principalmente a la presencia de flavonoides como vitexina y orientina (Silva et al., 2020; Villada-Ramos et al., 2023).

A pesar de este potencial funcional, una gran proporción de la biomasa foliar generada durante el manejo agronómico del cultivo continúa siendo desaprovechada, representando una pérdida potencial de recursos con valor agregado. En este sentido, el aprovechamiento de hojas de *Passiflora edulis* constituye una alternativa viable para fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y promover estrategias de producción más eficientes e integrales. Además, la utilización de extractos vegetales obtenidos a partir de biomasa residual se encuentra alineada con las tendencias actuales de consumo, donde existe una creciente demanda de productos naturales, saludables y funcionales que proporcionen beneficios adicionales a la salud del consumidor (Granato et al., 2020). Dentro de los alimentos funcionales con mayor crecimiento comercial destacan las gomitas, las cuales han ganado popularidad debido a su practicidad, facilidad de consumo y elevada aceptación sensorial en diferentes grupos poblacionales. Estas características convierten a las gomitas en una matriz alimentaria adecuada para la incorporación de compuestos bioactivos provenientes de extractos vegetales y subproductos agrícolas. Sin embargo, la adición de extractos foliares puede modificar atributos organolépticos como sabor, aroma, color y textura, afectando la aceptación del producto final por parte del consumidor (Stone et al., 2020).

Asimismo, el método de extracción utilizado influye significativamente en el perfil fitoquímico, concentración y estabilidad de los compuestos bioactivos presentes en los extractos vegetales. Métodos como infusión, obtención de hidrolato y extracción hidroetanólica presentan diferencias importantes en el rendimiento y composición química de los extractos obtenidos, lo que puede repercutir directamente en las propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales del producto desarrollado (Salles et al., 2020). De igual manera, el tipo de hidrocoloide empleado durante la formulación de gomitas, con grenetina, pectina o agar-agar, influye en características de textura, firmeza, elasticidad y sensación en boca, determinando en gran medida la aceptación del consumidor (Phillips & Williams, 2019).

Por lo tanto, resulta necesario evaluar la interacción entre el método de obtención del extracto foliar y el tipo de agente gelificante utilizado en la elaboración de gomitas funcionales a base de *Passiflora edulis*, con la finalidad de identificar formulaciones que presenten características sensoriales favorables y potencial de aceptación comercial. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo desarrollar y evaluar sensorialmente gomitas funcionales elaboradas con extractos foliares de *Passiflora edulis* obtenidos mediante diferentes métodos de extracción y formuladas con distintos agentes gelificantes, como estrategia de aprovechamiento agroindustrial de biomasa vegetal con potencial funcional y valor agregado.

PARTE EXPERIMENTAL

Localización del estudio
La presente investigación se desarrolló en los laboratorios de la Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas, donde se llevaron a cabo las etapas de procesamiento del material vegetal, obtención de extractos, elaboración de gomitas funcionales y evaluación sensorial.

Material vegetal
Las hojas de *Passiflora edulis* utilizadas en el presente estudio fueron recolectadas de plantas fisiológicamente sanas establecidas bajo un sistema de producción con manejo agronómico convencional. La selección del material vegetal se realizó considerando únicamente plantas que no presentaran síntomas visibles de estrés, deficiencias nutricionales, daños mecánicos o afectaciones causadas por plagas y enfermedades, con el propósito de garantizar la calidad y uniformidad de la materia prima empleada en la obtención de los extractos. Una vez realizada la colecta, las hojas fueron colocadas en bolsas de polietileno limpias y transportadas al laboratorio en condiciones que permitieran minimizar la pérdida de humedad y evitar posibles contaminaciones externas que pudieran alterar sus características fisicoquímicas. Posteriormente, el material vegetal fue sometido a un proceso de selección manual, eliminando hojas con signos de deterioro, necrosis, lesiones mecánicas o cualquier anomalía que pudiera comprometer la calidad del producto final.

Las hojas seleccionadas fueron lavadas cuidadosamente con agua potable para remover polvo, residuos de suelo y otras impurezas superficiales adheridas al tejido vegetal. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de desinfección mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio al 1 % durante 2 min, con la finalidad de reducir la carga microbiana presente en la superficie foliar. Finalizado este procedimiento, las hojas fueron enjuagadas con agua destilada para eliminar residuos del agente desinfectante y evitar posibles interferencias durante las etapas posteriores de procesamiento. Finalmente, el material vegetal fue sometido a un proceso de secado a temperatura ambiente bajo condiciones de sombra y ventilación natural hasta alcanzar peso constante. Este método de secado fue seleccionado con el propósito de minimizar la degradación térmica de compuestos bioactivos sensibles, tales como compuestos fenólicos y flavonoides, preservando así sus propiedades funcionales. Una vez secas, las hojas fueron almacenadas en recipientes herméticos protegidos de la luz y la humedad hasta su utilización en la obtención de los diferentes extractos evaluados en la investigación, siguiendo recomendaciones reportadas para la conservación de metabolitos bioactivos en especies vegetales (Silva et al., 2020).

Obtención de extractos foliares
Se evaluaron tres métodos de extracción de compuestos bioactivos a partir de hojas de *Passiflora edulis*: infusión, obtención de hidrolato y extracción hidroetanólica. La selección de estos métodos se realizó debido a su amplia aplicación en la recuperación de metabolitos secundarios presentes en especies vegetales y a su capacidad para extraer compuestos con diferentes polaridades y propiedades funcionales. Cada método presenta mecanismos de extracción particulares que influyen en el rendimiento y composición química del extracto obtenido, permitiendo recuperar compuestos fenólicos, flavonoides y sustancias aromáticas en distintas concentraciones. Asimismo, las diferencias en los procesos de extracción pueden repercutir directamente en las características fisicoquímicas, funcionales y sensoriales del producto final. Por ello, la comparación de estos métodos permitió identificar el procedimiento más adecuado para la obtención de extractos con potencial aplicación en la elaboración de gomitas funcionales (He et al., 2020).

-) Infusión
La infusión se preparó utilizando hojas secas trituradas de *Passiflora edulis*. Se adicionaron 10 g de material vegetal en 100 mL de agua destilada a 90 °C durante 10 min. Posteriormente, el extracto fue filtrado mediante papel filtro Whatman No. 1 y almacenado en recipientes ámbar a 4 °C hasta su utilización siguiendo modificaciones de la metodología propuesta por Silva et al. (2020) para la obtención de extractos acuosos de hojas de *Passiflora edulis*.

-) Obtención de hidrolato
El hidrolato se obtuvo mediante destilación por arrastre de vapor utilizando hojas frescas de *Passiflora edulis*. El proceso se realizó durante 60 min, recuperando la fracción acuosa condensada rica en compuestos volátiles. El hidrolato obtenido se almacenó en refrigeración a 4 °C. Este procedimiento se basa en técnicas convencionales de destilación empleadas para la recuperación de compuestos aromáticos e hidrosolubles presentes en materiales vegetales (Boutekedjiret et al., 2003; da Silva et al., 2018).

-) Extracción hidroetanólica
Para la obtención del extracto hidroetanólico se utilizaron hojas secas molidas sometidas a maceración utilizando una solución hidroetanólica al 70 % (v/v) en una relación 1:10 (p/v). La mezcla permaneció en agitación constante durante 48 h a temperatura ambiente y protegida de la luz. Posteriormente, el extracto fue filtrado y concentrado parcialmente mediante evaporación del solvente a 40 °C, siguiendo metodologías reportadas para la extracción de compuestos fenólicos en especies vegetales (Salles et al., 2020).

Diseño experimental
Se utilizó un diseño factorial completamente al azar 3 × 3, donde el primer factor correspondió al método de extracción del material vegetal (infusión, hidrolato y extracto hidroetanólico), mientras que el segundo factor correspondió al tipo de agente gelificante empleado en la formulación de las gomitas (grenetina, agar-agar y pectina). La combinación de ambos factores originó nueve tratamientos experimentales (F1–F9), los cuales fueron elaborados y evaluados bajo condiciones homogéneas.

Código	Extracto	Gelificante
F1	Infusión (E1)	Grenetina (G1)
F2	Infusión (E1)	Agar-agar (G2)
F3	Infusión (E1)	Pectina (G3)
F4	Hidrolato (E2)	Grenetina (G1)
F5	Hidrolato (E2)	Agar-agar (G2)
F6	Hidrolato (E2)	Pectina (G3)
F7	Hidroetanólico (E3)	Grenetina (G1)
F8	Hidroetanólico (E3)	Agar-agar (G2)
F9	Hidroetanólico (E3)	Pectina (G3)

Tabla 1. *Tratamientos experimentales.*

Elaboración de gomitas funcionales
La unidad experimental estuvo constituida por un lote de gomitas elaborado a partir de 1 kg de mezcla base, formulado de acuerdo con el gelificante correspondiente (grenetina, agar-agar o pectina) y el tipo de extracto asignado. Las gomitas funcionales fueron elaboradas mediante calentamiento controlado de una mezcla base compuesta por agua destilada, azúcar, jarabe de glucosa y el respectivo agente gelificante. Una vez alcanzada la homogenización completa de la mezcla, se incorporó el extracto correspondiente a cada tratamiento. La mezcla se mantuvo bajo agitación constante hasta obtener una textura homogénea y posteriormente fue vertida en moldes de silicón previamente sanitizados. Las gomitas se dejaron enfriar a temperatura ambiente y posteriormente se almacenaron en refrigeración (4 °C) durante 24 h antes de su evaluación. La selección de

hidrocoloides como grenetina, pectina y agar-agar se realizó debido a su amplia utilización en productos de confitería y alimentos funcionales, ya que influyen significativamente en las propiedades de textura, firmeza y estabilidad del producto final (Phillips & Williams, 2019).

Variables evaluadas
Se evaluaron variables sensoriales relacionadas con la percepción y aceptación del producto por parte del consumidor, incluyendo color, aroma, sabor, dulzor, textura, sensación en boca y aceptación general.

Evaluación sensorial
La evaluación sensorial se realizó mediante una prueba hedónica de nueve puntos utilizando 40 panelistas no entrenados seleccionados aleatoriamente. Los participantes evaluaron atributos relacionados con color, aroma, sabor, dulzor, textura, sensación en boca y aceptación general. La escala hedónica utilizada correspondió a valores de 1 (“me disgusta extremadamente”) a 9 (“me gusta extremadamente”), metodología ampliamente utilizada en estudios de aceptación de alimentos funcionales y productos agroindustriales (Stone et al., 2020). Asimismo, se incluyó una evaluación de intención de compra y disposición de pago para una presentación comercial de 40 g.

Análisis estadístico
Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño factorial 3 × 3 para determinar el efecto del método de extracción y del tipo de gelificante sobre las variables sensoriales evaluadas. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), se realizó una prueba de comparación múltiple de medias mediante Tukey. El análisis estadístico se efectuó utilizando software estadístico especializado.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron que tanto el método de obtención del extracto foliar como el tipo de agente gelificante influyeron significativamente en las características sensoriales de las gomitas funcionales elaboradas con extractos de *Passiflora edulis*. El análisis de las evaluaciones realizadas por los 40 panelistas permitió identificar diferencias entre tratamientos en atributos relacionados con color, aroma, sabor, dulzor, textura, sensación en boca y aceptación general, lo que demuestra la importancia de la formulación en el desarrollo de productos funcionales derivados de biomasa vegetal.

De manera general, las gomitas elaboradas con extractos foliares de *Passiflora edulis* presentaron características sensoriales adecuadas y visualmente atractivas para los panelistas. En términos de apariencia, las formulaciones mostraron una estructura uniforme, buena consistencia y estabilidad física, observándose diferencias principalmente asociadas al tipo de gelificante utilizado (Figura 1). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en diversos estudios sobre productos tipo gomita elaborados con diferentes hidrocoloides. Las formulaciones elaboradas con pectina y grenetina presentaron una apariencia más brillante, homogénea y atractiva para los panelistas, mientras que aquellas formuladas con agar-agar mostraron una textura visualmente más firme y opaca.

Estas diferencias pueden atribuirse a las propiedades estructurales de cada agente gelificante, ya que la pectina y la grenetina favorecen la formación de geles más suaves, elásticos y con mayor brillo superficial, características asociadas con una mejor aceptación sensorial. DeMars y Ziegler (2001) señalaron que las formulaciones con pectina y grenetina producen estructuras más agradables desde el punto de vista sensorial, generando percepciones de mayor suavidad y mejor textura en comparación con geles más rígidos. Respecto al color, las tonalidades amarillas y ámbar observadas en las gomitas fueron bien aceptadas por los consumidores, posiblemente debido a su asociación con ingredientes naturales y productos de origen vegetal.



Figura 1. *Gomitas*

Por otra parte, el aroma y sabor característicos de *Passiflora edulis* fueron percibidos de manera favorable por los panelistas, aunque con diferencias relacionadas con el método de extracción utilizado. La literatura indica que los procesos de extracción modifican la concentración de compuestos aromáticos y fenólicos presentes en los extractos vegetales, lo que repercute directamente en la intensidad del sabor y aroma del producto final. Asimismo, Tarahi et al. (2023) mencionan que la selección del hidrocoloide influye en la liberación de compuestos volátiles y en la percepción sensorial de las gomitas funcionales. La textura y la sensación en boca fueron los atributos que mayor influencia tuvieron sobre la aceptación del producto. Las formulaciones con textura suave, elástica y fácil de masticar recibieron las mejores calificaciones, lo que coincide con diversos estudios que destacan que la elasticidad y la masticabilidad son factores determinantes en la preferencia del consumidor por productos tipo gomita.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que las hojas de *Passiflora edulis* pueden incorporarse exitosamente en matrices alimentarias tipo gomita sin afectar negativamente la aceptación sensorial, representando una alternativa viable para el desarrollo de productos funcionales con valor agregado y potencial de comercialización. En términos generales, las formulaciones elaboradas con extracto hidroetanólico presentaron una mayor aceptación sensorial en comparación con aquellas elaboradas mediante infusión o hidrolato. Esto puede atribuirse a que la extracción hidroetanólica favorece una mayor recuperación de compuestos fitoquímicos y compuestos aromáticos, permitiendo obtener características organolépticas más agradables y mejor equilibrio entre sabor y aroma. Por el contrario, las formulaciones elaboradas con hidrolato mostraron menor aceptación en algunos atributos, principalmente debido a una percepción menos intensa de sabor y menor preferencia en textura como se muestra en la Figura 2.

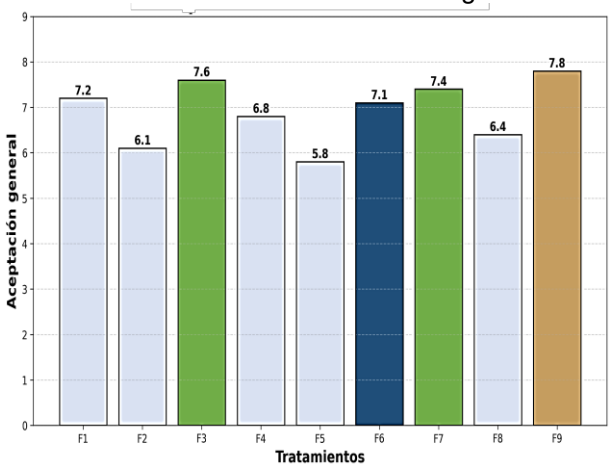


Figura 2. *Tratamiento con mayor aceptación sensorial*

El tipo de gelificante utilizado también mostró una influencia importante sobre la calidad sensorial del producto final. Las gomitas formuladas con pectina presentaron una textura más uniforme, suave y agradable en boca, obteniendo los valores más altos de aceptación general. Por el contrario, las formulaciones elaboradas con agar-agar mostraron una textura más rígida y menos elástica, característica que fue percibida de manera menos favorable por los evaluadores. Diversos estudios han señalado que los geles elaborados con agar presentan una estructura más firme y quebradiza, lo que puede disminuir la aceptación cuando el consumidor espera una textura suave y flexible característica de las gomitas comerciales. Esta condición pudo influir directamente en las menores puntuaciones obtenidas por los tratamientos formulados con este hidrocoloide. Las gomitas elaboradas con grenetina presentaron una aceptación intermedia, destacando principalmente por su elasticidad, consistencia y capacidad para proporcionar una sensación agradable durante la masticación.

La grenetina es ampliamente utilizada en la industria de confitería debido a su capacidad para formar geles flexibles y elásticos que mejoran la experiencia sensorial del consumidor. Sin embargo, en el presente estudio, las formulaciones con pectina superaron ligeramente a las elaboradas con grenetina, posiblemente debido a una mejor interacción con los extractos vegetales y una textura más equilibrada.

Entre todos los tratamientos evaluados, la formulación correspondiente al tratamiento F9 (extracto hidroetanólico + pectina) registró la mayor aceptación general, alcanzando una puntuación promedio de 7.8 ± 0.6 en la escala hedónica de nueve puntos. Este tratamiento destacó principalmente por presentar un mejor balance entre sabor, dulzor y textura, además de una percepción más favorable en la sensación en boca. Los panelistas describieron esta formulación como una gomita con textura agradable, sabor equilibrado y características sensoriales comparables con productos comerciales. Por otra parte, el tratamiento F5 (hidrolato + agar-agar) presentó la menor aceptación general, con una puntuación promedio de 5.3 ± 1.0. La menor preferencia observada en este tratamiento estuvo asociada principalmente a una textura considerada demasiado firme y una menor intensidad de sabor, lo que afectó negativamente la percepción global del producto como se muestra en la Figura 3.

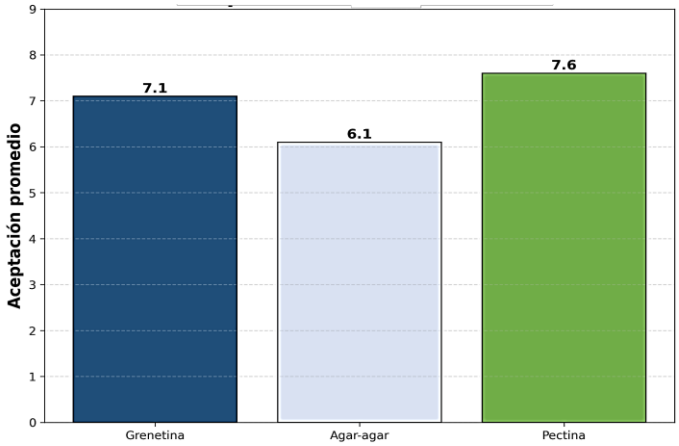


Figura 3. *Aceptación promedio según gelificante*

En relación con la intención de compra, los tratamientos con mayor aceptación sensorial también registraron una mayor disposición de consumo por parte de los panelistas (Figura 4). Particularmente, las formulaciones elaboradas con extracto hidroetanólico y pectina mostraron una tendencia favorable en la intención de compra, indicando un potencial importante para su posible comercialización como producto funcional innovador. Asimismo, una proporción considerable de los participantes manifestó disposición a adquirir una presentación comercial de aproximadamente 40 g, especialmente en rangos de precio intermedios, lo que sugiere viabilidad comercial del producto desarrollado.

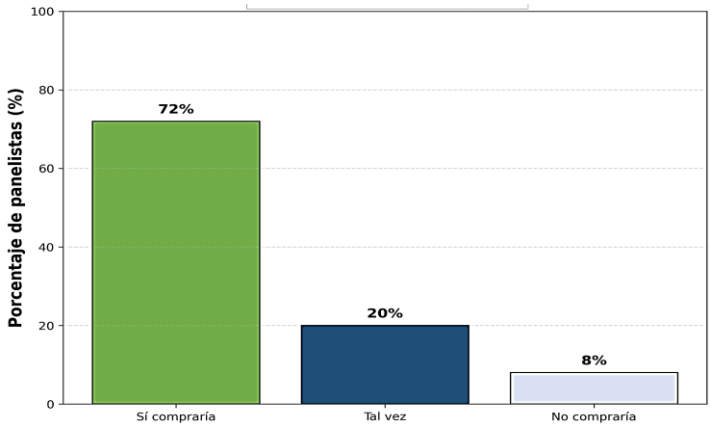


Figura 4. *Intención de compra*

Los resultados obtenidos demuestran que el aprovechamiento de hojas de *Passiflora edulis* representa una alternativa viable para el desarrollo de productos agroindustriales con valor agregado y aceptación sensorial favorable. Además, el uso de extractos foliares en matrices alimentarias tipo gomita evidencia el potencial funcional y comercial de esta biomasa vegetal, contribuyendo al aprovechamiento integral del cultivo y a la diversificación de productos derivados de especies tropicales con importancia agroalimentaria.

CONCLUSIONES

El método de obtención del extracto foliar y el tipo de agente gelificante influyeron significativamente en la aceptación sensorial de las gomitas funcionales elaboradas con extractos de *Passiflora edulis*. Las formulaciones presentaron diferencias en atributos como sabor, textura, dulzor y sensación en boca, evidenciando la importancia de la interacción entre el tipo de extracto y el hidrocoloide utilizado en la calidad organoléptica del producto final.

Entre los tratamientos evaluados, las gomitas elaboradas con extracto hidroetanólico y pectina mostraron la mayor aceptación general e intención de compra, destacando por su mejor balance sensorial y mayor preferencia por parte de los panelistas. En contraste, las formulaciones con hidrolato y agar-agar registraron menor aceptación, principalmente asociada a características menos favorables de sabor y textura. Los resultados obtenidos demuestran el potencial agroindustrial de las hojas de *Passiflora edulis* como fuente de compuestos funcionales para el desarrollo de productos innovadores con valor agregado, contribuyendo al aprovechamiento integral de biomasa vegetal y a la generación de alternativas funcionales con aceptación comercial favorable.

BIBLIOGRAFÍA

1. B. C. C. Salles, M. A. da Silva, L. Taniguthi, J. N. Ferreira, C. Q. da Rocha, W. Vilegas, P. H. Dias, P. C. Pennacchi, S. M. S. Duarte, M. R. Rodrigues, and M. R. P. L. Brigagão, "*Passiflora edulis* leaf extract: Evidence of antidiabetic and antiplatelet effects in rats," *Biol. Pharm. Bull.*, vol. 43, no. 1, pp. 169–174, 2020.
2. C. Boutekedjiret, F. Bentahar, R. Belabbes, and J. M. Bessière, "Extraction of rosemary essential oil by steam distillation and hydrodistillation," *Flavour and Fragrance Journal*, vol. 18, no. 6, pp. 481–484, 2003.
3. D. Granato, F. J. Barba, D. B. Kovačević, J. M. Lorenzo, A. G. Cruz, and P. Putnik, "Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 105, pp. 347–361, 2020.
4. FAO, "The state of food and agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction," Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

5. G. O. Phillips and P. A. Williams, *Handbook of Hydrocolloids*, 3rd ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2019.
6. G. Weyya, A. Belay, and E. Tadesse, "Passion fruit by-products as a source of bioactive compounds for non-communicable disease prevention: A systematic review," *Front. Nutr.*, vol. 11, p. 1340511, 2024.
7. H. Stone, R. N. Bleibaum, and H. A. Thomas, *Sensory Evaluation Practices*, 5th ed. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2020.
8. J. A. Villada-Ramos, J. Aguillón-Osma, B. Restrepo-Cortés, N. Loango-Chamarro, and M. E. Maldonado-Celis, "Identification of potential bioactive compounds of *Passiflora edulis* leaf extract against colon adenocarcinoma cells," *Biochem. Biophys. Rep.*, vol. 34, p. 101453, 2023.
9. J. K. R. da Silva, R. B. Andrade, A. S. Maia, and colaboradores, "Hydrolates: Chemical composition and biological activities of aromatic plant by-products," *Industrial Crops and Products*, vol. 115, pp. 95–103, 2018.
10. J. K. R. Silva, C. B. B. Cazarin, T. C. Colomeu, Â. G. Batista, L. M. M. Meletti, R. L. Zollner, and M. R. M. Junior, "Antioxidant activity of aqueous extract of passion fruit leaves: In vitro and in vivo study," *Food Res. Int.*, vol. 137, p. 109702, 2020.
11. L. L. DeMars and G. R. Ziegler, "Texture and structure of gelatin/pectin-based gummy confections," Food Hydrocolloids, vol. 15, no. 4–6, pp. 643–653, 2001.
12. M. Tarahi, M. M. Shahidi, M. Rashidinejad, A. K. Jafari, and M. A. Mohammadi, "Current innovations in the development of functional gummy candies," Foods, vol. 12, no. 24, Art. no. 4487, 2023.
13. S. D. Ramaiya, J. S. Bujang, M. H. Zakaria, W. S. King, and S. Shaffiq, "Sugars, ascorbic acid, total phenolic content and total antioxidant activity in passion fruit cultivars," *Sci. Hortic.*, vol. 243, pp. 238–244, 2019.
14. X. He, F. Luan, Y. Yang, Z. Wang, Z. Zhao, J. Fang, M. Wang, M. Zuo, and Y. Li, "*Passiflora edulis*: An insight into current researches on phytochemistry and pharmacology," *Front. Pharmacol.*, vol. 11, p. 617, 2020.

EFECTO DEL TITANIO EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE RÁBANO

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1]; Fernando Carlos Gómez-Merino[1]; Libia Iris Trejo-Téllez[1]; Juan Valente Hidalgo-Contreras[2]; Imelda Rueda-López[1]

[1]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. [2]Colegio de Posgraduados Campus Córdoba.
carbajal.victor@colpos.mx

RESUMEN

El titanio (Ti) es un elemento de transición que ocupa el noveno lugar en abundancia en la superficie terrestre y puede incrementar la productividad de los cultivos entre 10 y 20%. Beneficia parámetros agronómicos, fisiológicos y bioquímicos, al mejorar la captación de luz, estimular la actividad de la Rubisco y de otras enzimas fotosintéticas, favorecer la absorción de nitrato y aumentar la biomasa fresca. El rábano (*Raphanus sativus* L.) es una hortaliza de la familia Brassicaceae originaria de la región mediterránea y Asia oriental. Se adapta a climas templados y su órgano comestible principal es el hipocótilo engrosado asociado con la raíz. En México, su producción se concentra en estados como Puebla y Baja California, con volúmenes nacionales cercanos a 69 mil Mg anuales y superficies cultivadas superiores a 2 mil ha. Destaca por su aporte de vitamina C, vitaminas del complejo B, minerales como calcio, hierro y fósforo, además de fibra dietética. El material vegetal utilizado en este estudio consistió en plántulas de 20 d de edad obtenidas mediante la siembra de semillas de rábano cv. Champion en charola de unicel con 200 cavidades. Las plántulas se trasplantaron a macetas negras de 0.8 L con una mezcla de turba blanca y tezontle (1:1; v:v). Los tratamientos foliares con Ti (0, 5 y 10 mM) iniciaron a los 30 días después de la siembra (dds), aplicándose mediante aspersión hasta alcanzar el punto de goteo. Se efectuaron tres aplicaciones con intervalos de 10 días (30, 40 y 50 dds), realizadas a las 6:00 h. El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones y una planta por maceta como unidad experimental. A los 60 dds se evaluaron altura de planta, número de hojas y biomasa fresca de hojas. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y comparación de medias por la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$). La altura de planta y la biomasa fresca de hoja no fueron influenciadas en forma significativa por las dosis de Ti; sin embargo, ambas variables mostraron una tendencia de incremento respecto al testigo. Por otro lado, las dosis 5 y 10 mM Ti incrementaron significativamente la variable número de hojas en 14 y 9%, respectivamente, en comparación con el testigo. Estos resultados permiten concluir que la aplicación foliar de Ti mejora el crecimiento inicial de plántulas de rábano, principalmente mediante el incremento en el número de hojas.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático y el crecimiento poblacional son desafíos a nivel global que impactan la producción de alimentos, provocando escasez y deterioro de los recursos naturales, lo que amenaza la seguridad alimentaria. La agricultura juega un rol de alta importancia para alcanzar la seguridad, soberanía y autosuficiencia alimentaria, lo que implica promover prácticas que mejoren la producción sostenible de cultivos hortícolas y agroindustriales (Valeriano *et al*., 2026). La bioestimulación en cultivos es considerada una alternativa que beneficia la calidad y rendimiento dentro de la sostenibilidad agrícola. Los bioestimulantes agrícolas se clasifican en siete categorías principales basadas en su origen y naturaleza química: sustancias húmicas, hidrolizados de proteínas, extractos de algas, quitosano, elementos benéficos, hongos y bacterias.

Entre los elementos benéficos, el titanio (Ti) es un elemento de transición que ocupa el noveno lugar en abundancia en la superficie terrestre y puede incrementar la productividad de los cultivos entre 10 y 20%. Beneficia parámetros agronómicos, fisiológicos y bioquímicos, al mejorar la captación de luz, estimular la actividad de la Rubisco y de otras enzimas fotosintéticas, favorecer la absorción de nitrato y aumentar la biomasa fresca (Farahi, *et al*., 2023; Panahirad *et al*., 2024).

El rábano (*Raphanus sativus* L.) es una hortaliza de la familia Brassicaceae originaria de la región mediterránea y Asia oriental con una amplia variabilidad genotípica. Se adapta a climas templados y su órgano comestible principal es el hipocótilo engrosado asociado con la raíz. En México, su producción se concentra en estados como Puebla y Baja California, con volúmenes nacionales cercanos a 69 mil Mg anuales y superficies cultivadas superiores a 2 mil ha. Destaca por su aporte de vitamina C, vitaminas del complejo B, minerales como calcio, hierro y fósforo, además de fibra dietética y antioxidantes (de Guevara et al., 2005; Tuver *et al*., 2022; SADER, 2023).

TEORÍA

Diversos estudios científicos respaldan el uso del titanio (Ti) como bioestimulante en la agricultura. Entre las evidencias reportadas en hortalizas como el tomate, el Ti favorece parámetros de germinación y crecimiento vegetal, incrementa la tolerancia frente a condiciones de estrés y fortalece la resistencia a patógenos. Estos efectos se relacionan con la activación de genes involucrados en la replicación del ADN, la síntesis de proteínas ribosómicas y la señalización hormonal, además de potenciar la capacidad antioxidante de las células (Carbajal-Vázquez *et al*., 2025; Ma *et al*., 2025). Asimismo, se ha demostrado que el Ti influye positivamente en la calidad del fruto, disminuyendo el pH y aumentando la relación de sólidos solubles totales sobre acidez titulable (SST/AT), especialmente bajo condiciones de salinidad elevada (Carbajal-Vázquez *et al*., 2020), además de mejorar características de color asociadas con una mayor calidad comercial del tomate (Carbajal-Vázquez *et al*., 2023). En vid, la aplicación foliar de nanopartículas de TiO_2 reduce el daño oxidativo y aumenta la tolerancia a la sequía, debido a la activación de mecanismos antioxidantes y a la mejora de diferentes parámetros fisiológicos (Daler *et al*., 2024). En girasol, este elemento contribuye al incremento del rendimiento, la nutrición y el contenido de aceite, además de acelerar la maduración de las plantas (Kolenčík *et al*., 2020). Estos antecedentes respaldan el potencial del Ti como elicitor frente a estreses bióticos y abióticos, así como su uso en la agricultura. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del Ti aplicado vía foliar a plántulas de rábano cv. Champion en variables de crecimiento inicial.

PARTE EXPERIMENTAL

El material vegetal utilizado en este estudio consistió en plántulas de 20 d de edad obtenidas mediante la siembra de semillas de rábano cv. Champion en una charola de unicel con 200 cavidades usando turba blanca como sustrato (Súper Terra ST1 Hawita). Las plántulas se trasplantaron a macetas negras de 0.8 L con una mezcla de turba blanca y tezontle (1:1; v:v). A partir del trasplante, las plántulas se mantuvieron con solución de Steiner (Steiner, 1984) al 50% hasta la cosecha. Los tratamientos foliares con Ti (0, 5 y 10 mM) iniciaron a los 30 días después de la siembra (dds), aplicándose mediante aspersión hasta alcanzar el punto de goteo. Se efectuaron tres aplicaciones con intervalos de 10 días (30, 40 y 50 dds), realizadas a las 6:00 h. El experimento se condujo bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones y una planta por maceta como unidad experimental. A los 60 dds se evaluaron la altura de planta (AP) usando un flexómetro de 5 m (Wiseup; Yiwu, Zhejiang, China), el número de hojas (NH) mediante conteo manual del follaje y la biomasa fresca de hojas (BFH) con una balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, Estados Unidos). Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y comparación de medias por la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS

Las variables AP y BFH no fueron influenciadas en forma significativa por las dosis de Ti; sin embargo, ambas variables mostraron una tendencia de incremento: AP aumentó 6% con la dosis 5 mM Ti y 4% con la dosis 10 mM Ti en AP; de igual manera, BFH aumentó 33% con la dosis 5 mM Ti y 23% con la dosis 10 mM Ti, en todos los casos con respecto al testigo. Por otro lado, las dosis 5 y 10 mM Ti incrementaron significativamente la variable número de hojas en 14 y 9%, respectivamente, en comparación con el testigo. (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Efecto del titanio (Ti) en plántulas de rábano (*Raphanus sativus L.*) cv. Champion, en variables de crecimiento inicial.

Ti (mM)	Altura de Planta (AP; cm)	Número de Hojas (NH)	Biomasa Fresca de Hojas (BFH; g)
0	20.50±0.28 a	10.05±0.05 b	21.05±1.08 a
5	21.75±1.10 a	11.50±0.28 a	28.02±3.76 a
10	21.25±2.21 a	11.01±0.40 a	25.93±0.80 a

mM = milimolar. Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Duncan, $p \leq 0,05$).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la aplicación foliar de titanio favoreció principalmente la emisión de hojas, ya que ambas dosis evaluadas incrementaron significativamente el número de hojas respecto al testigo. Aunque la altura de planta y la biomasa fresca de hojas no presentaron diferencias estadísticas respecto al testigo, ambas variables mostraron una tendencia positiva, especialmente con la dosis de 5 mM Ti. Estos resultados sugieren que el titanio puede estimular el crecimiento vegetativo de las plantas, siendo la dosis de 5 mM la que presentó la respuesta más favorable en las variables evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Steiner, “The Universal Nutrient Solution”. *In*: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*, Lunteren, The Netherlands, 29 April-5 May 1984; I.S.O.S.C.: Wageningen, The Netherlands, 1984, pp. 633-649.
2. M. Kolenčík, D. Ernst, M. Urík, L. Ďurišová, M. Bujdoš, M., Šebesta, E. Dobročka, S. Kšinan, R. Illa, Y. Qian, H. Feng, I. Černý, V. Holišová, G. Kratošová, “Foliar application of low concentrations of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles to the common sunflower under field conditions”, Nanomaterials, Vol. 10, 8, 2020, 1619.
3. O. C. Valeriano, M. P. Sánchez, F. I. Ocampo, “Del traspatio a la mesa: aprovechamiento de cultivos para alimentación familiar en Cuilápam de Guerrero, Oaxaca, México”, Acta Univ., Vol. 36, 2026, e4533.
4. S. Daler, O. Kaya, N. Korkmaz, T. Kılıç, A. Karadağ, H. Hatterman-Valenti, “Titanium nanoparticles (TiO_2-NPs) as catalysts for enhancing drought tolerance in grapevine saplings”, Horticulturae, Vol. 10, 10, 2024, 1103.
5. S. M. M. Farahi, M. E. T. Yazdi, E. Einafshar, M. Akhondi, M. Ebadi, S. Azimipour, H. Mahmoodzadeh, A. Iranbakhsh, “The effects of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles on physiological, biochemical, and antioxidant properties of Vitex plant (*Vitex agnus-castus* L.)”, Heliyon, Vol. 9, 11, 2023.
6. S. Panahirad, M. Dadpour, G. Gohari, V. Fotopoulos, “Simultaneous application of titanium dioxide (TiO_2) and zinc oxide (ZnO) nanoparticles ameliorates lead (Pb) stress effects in medicinal plant *Echinacea purpurea* (L.) Moench”, Plant Stress, Vol. 13, 2024, 100546.
7. SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). El oro rojo, rábano orgullo mexicano, 2023. Consultado en línea el 7 de enero de 2026, de https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-oro-rojo-rabano-orgullo-mexicano
8. Tuver, G. Y., Ekinci, M., & Yildirim, E. (2022). Morphological, physiological and biochemical responses to combined cadmium and drought stress in radish (*Raphanus sativus* L.). Rend. Lincei. Sci. Fis. Nat., 33(2), 419-429.
9. V. H. Carbajal-Vázquez, F. C. Gómez-Merino, J. A. Herrera-Corredor, A. Contreras-Oliva, G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez, “Effect of titanium foliar applications on tomato fruits from plants grown under salt stress conditions”, Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca, Vol. 48, 2, 2020, pp. 924-937.

10. V. H. Carbajal-Vázquez, L. I. Trejo-Téllez, G. Alcántar-González, J. A. Herrera-Corredor, F. C. Gómez-Merino, “Silicon and titanium affect the percentage of juice and color attributes in tomato fruits of plants exposed to salt stress”, Agro Productividad, Vol. 16, 4, 2023, pp. 3-12.
11. V. H. Carbajal-Vázquez, L. I. Trejo-Téllez, J. L. Mejía-Méndez, J. Salinas-Ruiz, F. C. Gómez-Merino, “Biostimulant effects of titanium dioxide nanoparticles on germination and initial growth of tomato: Evidence of hormesis”. PeerJ, Vol. 13, 2025, e20516
12. V. R. L. de Guevara, C. Q. Santiago, J. C. A. Pulido. “Hortalizas, las llaves de la energía”, Rev. Digital Univ., Vol. 5, 7, 2005, 1-30.
13. Y. B. Ma, W. L. Li, J. H. Li, M. J. Li, X. Y. Li, C. M. Wei, C. X. Li, Y. Wang, Y. Zhao, X. R. Ma, “Titanium ions promote tomato growth and increase stress resistance”, BMC Plant Biol., Vol. 25, 1, 2025, 995.

DE LA SÍNTESIS VERDE A LA APLICACIÓN AGRÍCOLA Y LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA

Hilda Araceli, Zavaleta Mancera[1], Abigail Mendieta Morales[1], Johana Zárate Escobedo[2], Amelia López Herrera[3], Columba Vicencio Salas Solís[1], Luis Manuel Carrillo López[1]

[1]Programa de Posgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. [2] Cátedra, Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT). [3] Posdoctorante, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).
arazavaleta@colpos.mx

RESUMEN

La síntesis verde de nanopartículas de plata (NPsAg) se refiere a un método que utiliza extractos vegetales para la síntesis de partículas cristalinas ≤ 100 nm. Esta técnica de síntesis, comparada con otras técnicas químicas y físicas, es reconocida por ser eficiente, económica y especialmente amigable con el ambiente. La aplicación de NPs en la agricultura es un tema emergente, pero la evaluación del impacto de estas en el ambiente está pendiente. Nuestro grupo de trabajo ha investigado la síntesis verde de NPsAg con diferentes fuentes vegetales, su aplicación agrícola y su efecto en el ambiente, usando un modelo de helecho acuático. Las metodologías usadas en la caracterización de las NPs son: el estudio del plasmón de resonancia superficial (PRS) con espectroscopía de UV-Vis para corroborar la síntesis, microscopía electrónica (ME) de transmisión (MET) para morfometría; SAED para el estudio cristalográfico y microscopía de alta resolución (HR-MET). Para conocer la cuantificación y localización de Ag se usó espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES) y espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) acoplada a MET y MEB. Los estudios fisiológicos y bioquímicos de tejido, incluyeron: la evaluación de pigmentos fotosintéticos, actividad antioxidante total, H_2O_2, actividad de enzimas antioxidantes (CAT, SOD) [3, 6, 7, 8, 9]. Los extractos vegetales con altos contenidos de moléculas reductoras, como fenoles y terpenoides, son excelentes opciones para la síntesis de NPsAg. Entre las especies vegetales probadas se encuentran: epazote (*Chenopodium ambrosioides*), cedro rojo (*Cedrela odorata*) y cempasúchil (*Tagetes erecta*) cuyos tamaños de NPsAg fueron, en promedio de 6 nm, 20 nm y de 13-23 nm [1, 2, 3]. Estas NPs fueron antibacterianas contra la bacteria *Erwinia amylobora* y el hongo *Fusarium circinatum*, los cuales producen enfermedades en frutales y especies forestales[2,3]. La NPsAg también son efectivas en el retraso de la senescencia de tallos florales de rosa (*Rosa hybrida*) y clavel (*Dianthus caryophyllus*), reduciendo el bloqueo vascular y manteniendo el balance hídrico y mejorando la apertura floral [4]. El efecto ambiental de las NPsAg se evaluó en dos modelos: 1) simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae*, 2) hongo micorrízico arbuscular (*Rhizophagus intraradices*) en asociación con *Trifolium repens*. En *Azolla* pudo realizarse un monitoreo de la internalización de las nanopartículas, llegando a la conclusión de que la mayoría de las NPsAg quedan en la superficie radical, de donde se liberan iones de plata (Ag^+), los cuales ingresan a la corteza y en la endodermis se vuelven a formar, para finalmente pasar al sistema vascular. En particular, la concentración de 100 mg L^{-1} de NPsAg produjo en *Azolla* estrés oxidativo, daños a nivel anatómico y alteraciones fisiológicas y bioquímicas [5] y en *T. repens* las NPsAg redujeron la colonización micorrízica y la producción de esporas. En contraste, 1 y 10 mg L^{-1} de NPsAg aumentaron la colonización micorrízica en trébol.

La aplicación de las nanopartículas en la agricultura es prometedora, pero hacen falta estudios para evaluar el impacto de estas en los sistemas de cultivo y el ambiente.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología agrícola se inició formalmente a principios de los años 2000, aunque las nanoestructuras ya se habían aplicado en otras áreas mucho antes. En el Colegio de Postgraduados

en Ciencias Agrícolas, en el 2006, la Línea Prioritaria de Investigación LPI 16: "Innovación Tecnológica", inició con la nanotecnología para el sector agropecuario, siendo una de las primeras en México. Una de las temáticas abordadas fue la síntesis verde de nanopartículas de plata (NPsAg) y su aplicación en el ámbito agrícola. Las nanopartículas metálicas, son estructuras cristalinas cuyas dimensiones son ≤ 100 nm. Estas nanoestructuras se utilizan ampliamente en diversos campos de la ciencia debido a su tamaño reducido y a su elevada relación superficie-volumen. En particular, las nanopartículas de plata (NPsAg) destacan por sus notables propiedades antimicrobianas y fotoeléctricas, que las convierten en componentes de cremas, pinturas, material quirúrgico y otros productos de uso cotidiano. Existen métodos físicos (ablación láser, irradiación gamma, irradiación electrónica), químicos (reducción química, métodos fotoquímicos) y biológicos (plantas, microorganismos, hongos, etc.) para la síntesis de NPsAg. La síntesis verde es un método de fabricación denominado "bottom-up" (de lo sencillo a lo complejo) que utiliza extractos de plantas ricos en metabolitos secundarios, como fenoles, flavonoides, terpenoides y taninos (**Fig. 1**) [1]. Entre sus principales beneficios destaca ser una alternativa sencilla, económica, ecológica y sostenible que minimiza el impacto ambiental y la generación de desechos tóxicos asociados a otros métodos. La fabricación de nanopartículas mediante rutas de síntesis verde se alinea con los principios de la agricultura sustentable (**Fig. 2**) [2]. Estas nanopartículas metálicas se pueden caracterizar mediante Microscopía Electrónica (morfología y tamaño), espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) (composición química), espectroscopía de UV-Vis (resonancia de plasmón superficial), patrón SAED (estudio cristalográfico y microscopía de alta resolución) (**Fig. 3**).

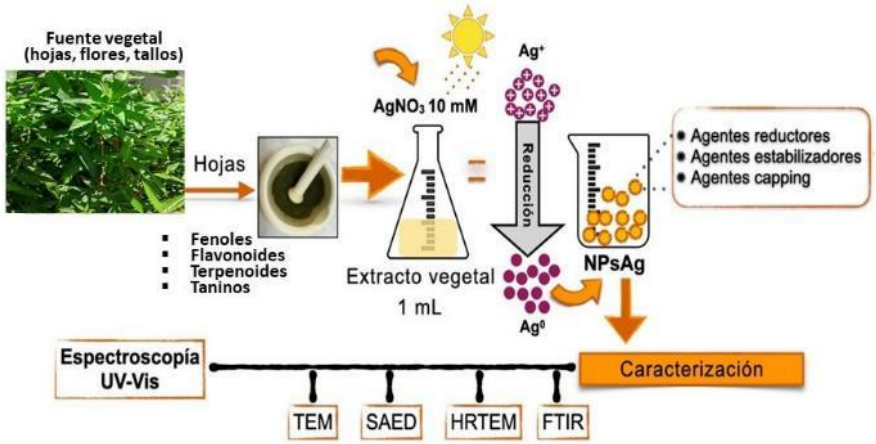


Figura 1. Ilustración esquemática de la síntesis verde de NPsAg asistida con extractos vegetales (Modificación de [3]).

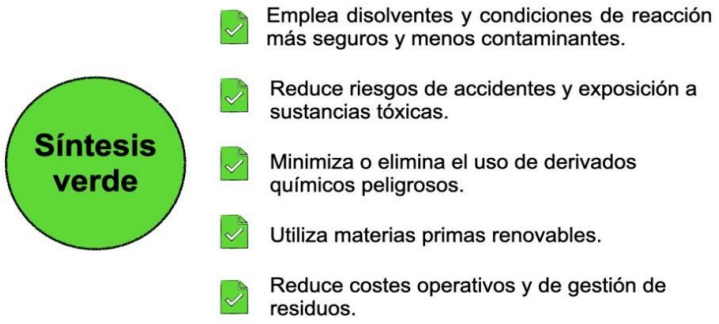


Figura 2. Principales ventajas de la síntesis verde.

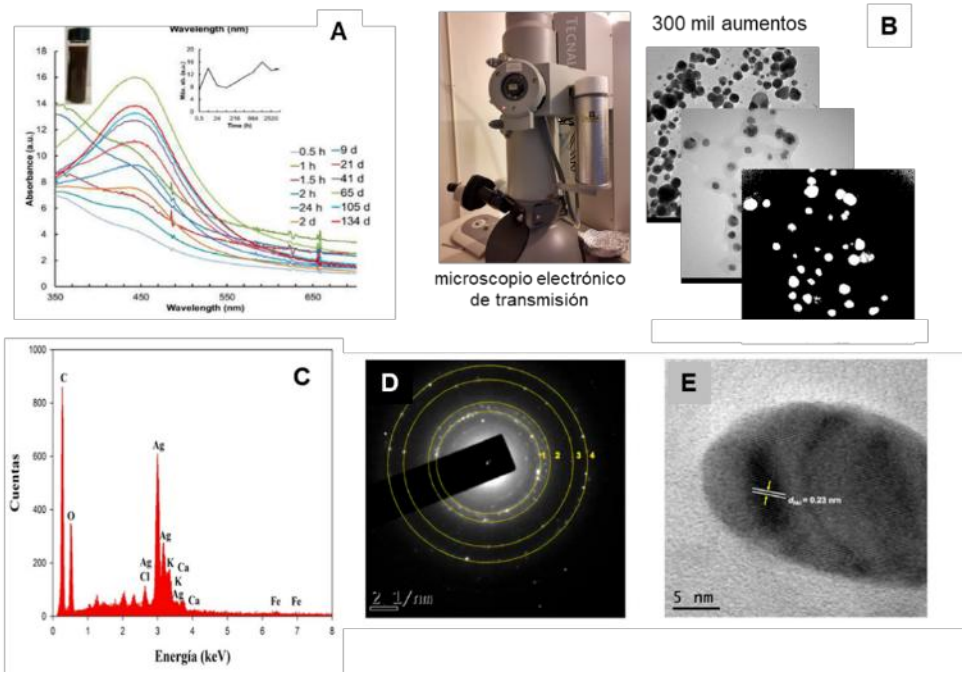


Figura 3. Métodos de estudio de nanopartículas. A) Espectro UV-Vis de AgNPs sintetizadas con 5 mL de extracto acuoso de pétalos de *Tagetes erecta* en función del tiempo; B) Estudio morfométrico de NPs de Ag con imágenes MET Tecnai 2 Biotwin, Thermo Fisher; C) Espectro EDS de una nanopartícula de plata; D) Patrón SAED de una sola partícula, con anillos concéntricos que corresponden a la fase cristalina cúbica centrada en las caras (fcc) de Ag; E) Alta resolución MET (HR-MET); el valor d_{hkl} de 0.23 nm corresponde al plano interatómico (111) de Ag.

Aplicación de nanopartículas de síntesis verde en la agricultura

La aplicación de nanopartículas de síntesis verde en la agricultura ha demostrado su capacidad para controlar enfermedades fitopatógenas, debido a sus propiedades antibacterianas y antifúngicas [2,3], lo que contribuye a reducir las pérdidas en cultivos de importancia agrícola. En particular, la floricultura puede beneficiarse del desarrollo de productos a base de NPsAg. La producción de flores de corte tiene potencial en el país, ya que existe una amplia demanda, tanto nacional como extranjera, del producto agrícola (SADER, 2025) [4]. Asimismo, se trata de un cultivo de alto costo debido a los insumos que requiere. La investigación sobre productos que otorguen mayor valor a las flores de corte, como la rosa y el clavel, es necesaria en México. En este sentido, este trabajo tuvo como objetivo obtener NPsAg mediante una síntesis verde asistida con *Camellia sinensis* (L.) y *Tagetes erecta*, para emplearlas en soluciones florero y prolongar la vida útil de rosas y claveles de corte. También, el uso de NPsAg de síntesis verde representa una herramienta innovadora para el control de enfermedades causadas por bacterias y hongos mediante prácticas más sustentables [2, 5].

Impacto de la NPsAg en el ambiente

Cualquier tecnología emergente debe evaluarse por su impacto ambiental. Debido al pequeño tamaño (1– 100 nm) de las AgNPs. Estas nanoestructuras pueden llegar a los ecosistemas acuáticos y terrestres, generando efectos nocivos en los organismos vivos y en el medio ambiente, por lo que es importante evaluar no solo los beneficios sino también sus posibles riesgos. Entre los aspectos clave de la evaluación ambiental de las NPs se encuentran: 1) estudio del transporte y destino final, 2) bioacumulación en la biosfera, 3) evaluación del desarrollo de microorganismos, plantas y especies acuáticas. Además de su impacto ambiental, las nanopartículas ofrecen soluciones tecnológicas clave, tales como la remediación de aguas residuales y la generación de energía limpia.

TEORÍA

Los extractos vegetales con metabolitos bioactivos poseen un gran potencial para la síntesis de nanopartículas de plata (NPsAg). Se requiere investigar los mecanismos de síntesis y los metabolitos responsables de su reducción y estabilización. Estas partículas son prometedoras en la agricultura, ya que pueden combatir microorganismos patógenos, especialmente en un contexto de resistencia a antibióticos. El estudio se enfoca en evaluar la síntesis verde y su aplicación en cultivos de interés ornamental, sus efectos frente a fitopatógenos y efectos fitotóxicos en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* y el hongo micorrícico arbuscular (*Rhizophagus intraradices*) en asociación con *Trifolium repens*.

PARTE EXPERIMENTAL

Síntesis de NPs Ag y plasmón de resonancia superficial

El extracto vegetal se obtuvo mediante la ebullición (95 °C) por 5 min de 2 g de la biomasa seca (BS) (*Camellia sinensis*), pétalos y hojas de *Tagetes erecta*, y corteza de *Cedrela odorata* en 100 mL de agua desionizada, se enfrió a 22 °C y se filtró con papel Whatman No. 4. De una solución 10 mM de AgNO3 (Sigma Aldrich de México, ACS ³ 99.0 %) preparada con agua desionizada, se tomaron 5 mL, se adicionaron (1, 2, 3, 5 mL) de extracto acuoso vegetal y después se aforó a 15 mL con agua desionizada (modificación de Carrillo, 2014) y se expuso 5 min a la luz solar. Despues de 1-5 min se observo un cambio de color a marrón, lo que indicó la formación de nanopartículas. La formación de las NPs se evaluó con espectroscopia (UV-vis) en un Espectrofotómetro HP 845x UV-visible System en un rango de 350 a 700 nm, para verificar la presencia del plasmón de resonancia superficial (PRS) [3, 6, 7].

Caracterización morfométrica mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM)

El coloide con NPs se diluyó entre 1:10 y 1:00 en agua desionizada. Una alícuota de 4 µL se colocó sobre rejillas de cobre (malla 400) recubiertas con Formvar y carbón. Las rejillas se dejaron secar en una caja de Petri y se observaron con un microscopio electrónico de transmisión (JEM-2010 JEOL) operado a 120 kV. Las imágenes se analizaron con el software ImageJ (Scion Corporation, versión 1.45) para estimar la distribución de tamaño. El patrón cristalino de las NPsAg se confirmó mediante la obtención de patrones de difracción de electrones de área seleccionada (SAED) [6, 7].

Análisis de metabolitos secundarios

La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es el método preferido para identificar los grupos funcionales involucrados en la síntesis verde de nanopartículas metálicas, ya que proporciona información sobre las posibles familias de moléculas que intervienen en la reducción y la estabilidad de las NPs. Se analizaron muestras antes y después de la síntesis para determinar los posibles grupos funcionales involucrados en la síntesis y estabilización de las NPsAg [9]. Los metabolitos secundarios de los extractos vegetales se estudiaron primero mediante un análisis fitoquímico preliminar con cromatografía en capa fina para detectar la presencia de fenoles, flavonoides, taninos y saponinas en los extractos acuosos de hojas y de corteza, y para identificar moléculas más específicas se usó HPLC [3].

Composición y estructura cristalina de las NPsAg

La estructura cristalina se refiere al ordenamiento repetido de los átomos y moléculas dentro de un material, que define su composición, tamaño y propiedades físicas, ópticas y magnéticas, entre otras. La composición de las NPsAg fue estudiada mediante espectroscopía de dispersión de rayos X (EDS) acoplada al microscopio electrónico de barrido (JEM 6390, Jeol, Japón). La cristalinidad se estudió mediante la difracción de electrones de área selecta (SAED) en un MET. La microscopía electrónica de alta resolución (HR-TEM) también es una técnica para determinar la distancia entre planos interatómicos.

Establecimiento de experimentos de solución florero

Para tallos de *Rosa* spp., se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 15 repeticiones por tratamiento. Las unidades experimentales se colocaron a temperatura ambiente y se evaluaron diferentes soluciones florero, incluyendo una concentración de 1 mg de NPsAg L-1: a) NPsAg, NPsAg + 2% sacarosa, NPsAg + ácido cítrico (pH 5), NPsAg + ácido cítrico pH 5) + 2%sacarosa, además de un testigo sólo con agua. Las variables evaluadas fueron: vida de florero, peso fresco relativo, días de máxima apertura floral y recuento bacteriano en solución [6].

Establecimiento del cultivo hidropónico y evaluación de fitotoxicidad de las NPsAg en el simbiosistema *Azolla-Anabaena Azollae*

El helecho acuático *Azolla filiculoides* Lam., vive en simbiosis con *Anabaena azollae* Strass., una cianobacteria filamentosa que fija N_2 atmosférico, además de ser una planta biorremediadora de metales y compuestos orgánicos. El simbiosistema se estableció en invernadero, cultivado en hidroponía con solución nutritiva Yoshida y sin fuente de N, con dosis crecientes de NPs Ag (1, 10 y 100 µg mL^{-1}) (**Fig.4**) [8].



Figura 4. Flujo de trabajo experimental para evaluar el impacto ambiental de las NPsAg: (1) El simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* en hidroponía e invernadero; (2) Análisis con microscopía óptica y electrónica de barrido (modo STEM-BSE) y EDS; (3) Análisis de la concentración de Ag en el tejido mediante ICP-OES.

Análisis de la concentración de Ag en el tejido mediante ICP-OES

La concentración de Ag se determinó mediante espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES; modelo 725-ES, Agilent Technologies, EE.UU.), empleando una longitud de onda analítica de 338.289 nm. Los resultados se reportaron en función del peso seco de la muestra [8].

Distribución de la Ag y las NPsAg en la raíz de A*. filiculoides* con MEB y EDS

Para conocer la distribución de la Ag en la raíz, los fragmentos de tejido se fijaron en solución Karnovsky modificada (4% paraformaldehído, 2.5% glutaraldehído en amortiguador de fosfatos Sorensen´s 0.1 M pH 7.2). Después de la fijación las muestras se incluyeron en resina Spurr de dureza media de acuerdo al fabricante (Electron Microscopy Sciences). Se obtuvieron cortes semi-finos (1 µm) que se tiñeron con solución AMA (1% azul de metileno y 1% Azure en agua) y se observaron en microscopía de luz. Se obtuvieron cortes ultrafinos (60-80 nm) y se montaron en rejillas de cobre (malla 70 y 200) con cubierta de Formvar/carbón y contrastadas con 2 % de acetato de uranilo y 2% de citrato de plomo. Las muestras fueron observadas en un microscopio electrónico

de emisión de campo (SEM-FEI-FIB Dual Beam, Helios Nanolab 600, Thermo Fisher Scientific-FEI), operado a alto vacío y a 5 kV. Las áreas brillantes observadas con BSE fueron corroboradas mediante EDS [8].

Análisis estadístico

Los datos que no cumplieron los supuestos de normalidad de la prueba de Shapiro-Wilk se analizaron mediante estadística no paramétrica. Los tratamientos con datos normales fueron analizados mediante la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$) con SAS 9.4 (Instituto SAS Inc.).

RESULTADOS

Síntesis

El extracto acuoso de hojas de *Tagetes erecta* produjo NPsAg de morfología cuasi-esférica con un diámetro de 17.64 ± 8.87 nm y una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (fcc) correspondiente a Ag^0. Estas partículas presentaron una notable estabilidad y una longevidad de hasta 2 años. El extracto acuoso de *Camellia sinensis* produjo NPsAg con un tamaño promedio de 21.51±0.63 nm, y el 81.6% de las NPsAg fueron menores de 30 nm. El cambio de color de la suspensión ocurrió casi de forma inmediata y la formación del efecto plasmón de resonancia superficial corroboró la síntesis de NPsAg (**Fig. 5**).

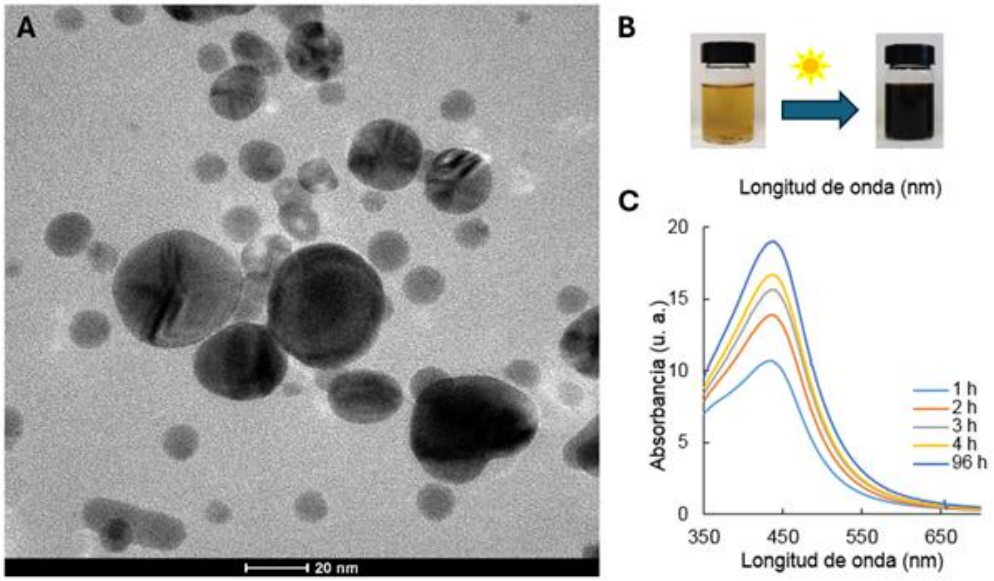


Figura 5. Síntesis biogénica de NPsAg con extracto acuoso de *Camellia sinensis*. A) Micrografía MET, Tecnai 2G Spirit (Fei, Thermo Fisher Scientific, USA), a 120 kV. B) Suspensión de nanopartículas antes y después de su exposición a la luz solar. C) Efecto del plasmón de resonancia superficial a 1, 2, 3, 4 y 96 h de síntesis.

Biomoléculas reductoras en los extractos vegetales

La cromatografía en capa fina permitió identificar los grupos funcionales y metabolitos secundarios involucrados en la reducción y estabilización de las NPsAg. Estas moléculas fueron principalmente fenoles, flavonoides, terpenoides y taninos (**Fig. 6**).

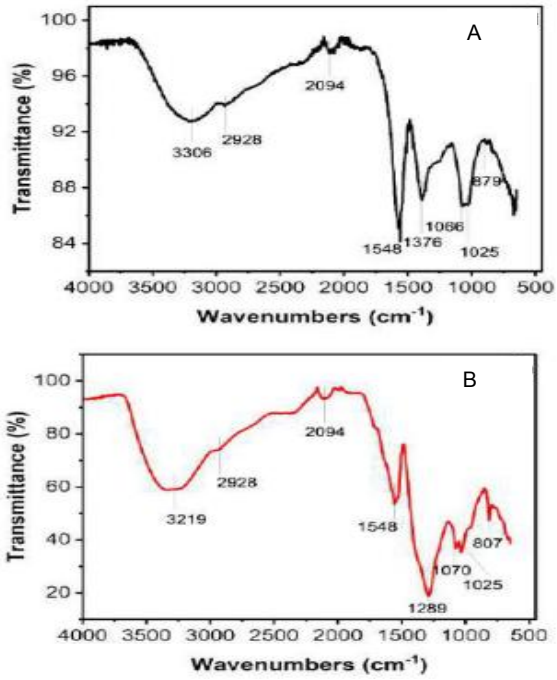


Figura 6. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) de hojas de *T. erecta.* A) Líneas en negro antes de la síntesis de NPsAg; B) Líneas rojas del extracto después de la síntesis.

La Fig. 6 muestra el espectro FTIR del extracto acuoso de la hoja de *T. erecta*. Este estudio mostró una fuerte absorción en las bandas a 3306 cm−1, 3219 cm−1, 3296 cm−1 y 3249 cm^{-1}, correspondientes a las vibraciones de los grupos O-H de alcoholes y fenoles. Las bandas a 2928 cm^{-1} y 2918 cm^{-1} se atribuyen a las uniones N-H, mientras que las bandas a 2094 cm^{-1} y 2089 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones C-H. Las bandas intensas presentes en ambas muestras a 1376 cm^{-1}, 1289 cm^{-1}, y 1278 cm^{-1} indicaron uniones sencillas C-O. Las vibraciones de anillos aromáticos y grupos fenoles fueron identificadas en la absorción de las bandas a 879 cm^{-1}, 868 cm^{-1}, 807 cm^{-1}, 812 cm^{-1}, 799 cm^{-1}, y 772 cm^{-1} **(Fig. 6).**

La NPsAg alargan la vida de la flor corte

El tratamiento que obtuvo la mayor vida de florero de rosa fue el de la solución con 1 mg de NPsAg L-1 + ácido cítrico (7.3 días), y mantuvo en peso fresco un 89.5% y una menor carga bacteriana (0.17 y 0.85 UFC) en el tercer y séptimo día de evaluación. En contraste, el testigo (agua) tuvo una vida promedio de 3.2 días, y un peso fresco relativo del 57.68%. La sacarosa afectó significativamente la vida del florero de las rosas; las soluciones con 1 mg NPsAg L^{-1} a las que se les añadió sacarosa (2%) obtuvieron resultados similares al testigo. Además, la adsorción de Ag^{+} en los tallos podría interferir con la síntesis de etileno, retrasando la apertura floral de las rosas, lo que favorece la calidad de las flores y su comercialización (**Fig. 7**).

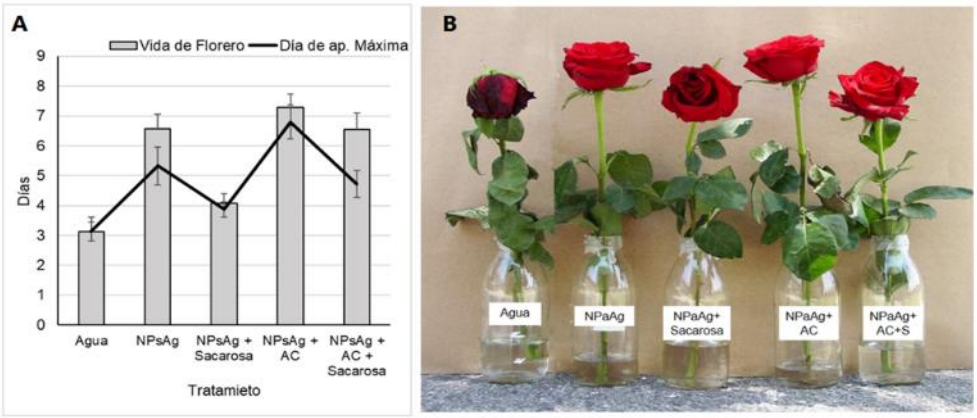


Figura 7. Rosas de corte en soluciones de florero con NPsAg. A) Días de vida de florero y días de apertura máxima floral de tallos de rosa en los tratamientos: agua; 1 mg NPsAg L^{-1}; 1 mg NPsAg L^{-1} + 2% sacarosa; 1 mg NPsAg L^{-1} + ácido cítrico (pH5); 1 mg NPsAg L^{-1} + ácido cítrico (pH5) + 2%Sacarosa. B) Apariencia de los tallos florales al séptimo día de la evaluación. Figura modificada de [6].

El clavel (*Dianthus caryophyllus*) es una de las flores de corte más importantes en la industria florícola [8]. Sin embargo, la contaminación microbiana en la solución preservativa de florero es una de las principales causas del deterioro de la flor [9]. Estos microorganismos colonizan el extremo del tallo, bloquean los vasos del xilema, reduciendo el transporte de agua y provocando el marchitamiento prematuro de las flores [10]. La aplicación de 50 NPsAg L^{-1} en la solución preservativa prolonga la vida en florero de clavel hasta 24 d, con una probabilidad de supervivencia del 23%. En contraste, el tratamiento con 100 mg de NPsAg L^{-1} y el control (agua) no mostraron ningún beneficio (**Fig. 8**).

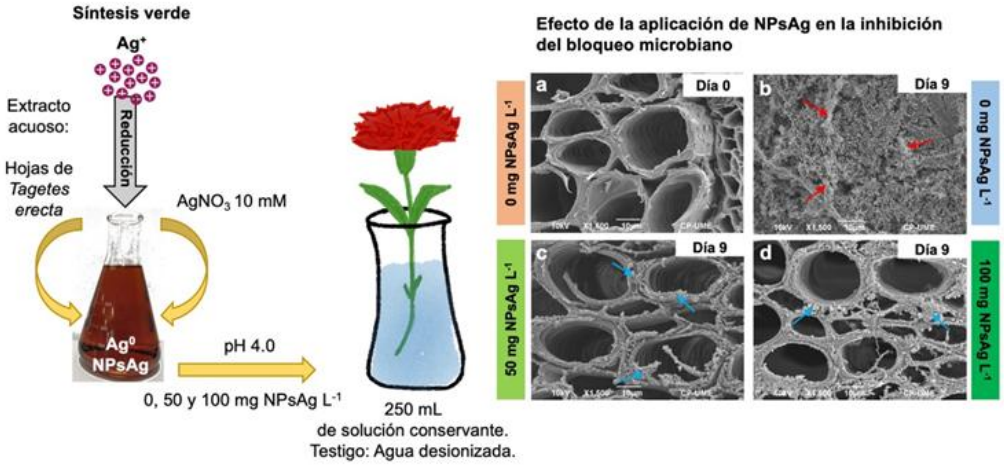


Figura 8. Las NPsAg de síntesis verde prolongan la vida útil del florero de clavel (*D. caryophyllus*). a) control, día 0, b) Control, día 9, c) 50 mg NPs Ag L^{-1} día 9, d) 100 mg NPs Ag L^{-1} día 9. Las flechas rojas indican consorcios microbianos. Las flechas azules indican residuos de degradación microbiana de naturaleza desconocida.

Control de enfermedades bacterianas y fúngicas en la agricultura

Las NPsAg sintetizadas con *Tagetes erecta*, en concentraciones de 360 mg y 200 mg NPsAg L^{-1}, demostraron ser efectivas contra *Erwinia amylovora,* una bacteria gramnegativa, responsable de

grandes pérdidas en cultivos de la familia Rosaceae, como el peral y el manzano (**Fig. 9**). La actividad antibacteriana se atribuye a varios mecanismos de acción, entre ellos: 1) el tamaño de las partículas (17.64 nm) que les permite penetrar la pared celular y dañar directamente la membrana bacteriana, alterando su permeabilidad, 2) la liberación de Ag^{+} que interactúan con los grupos tiol (–SH), inhibiendo las enzimas respiratorias y desencadenando la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO), lo cual conduce finalmente a la muerte del patógeno**.**

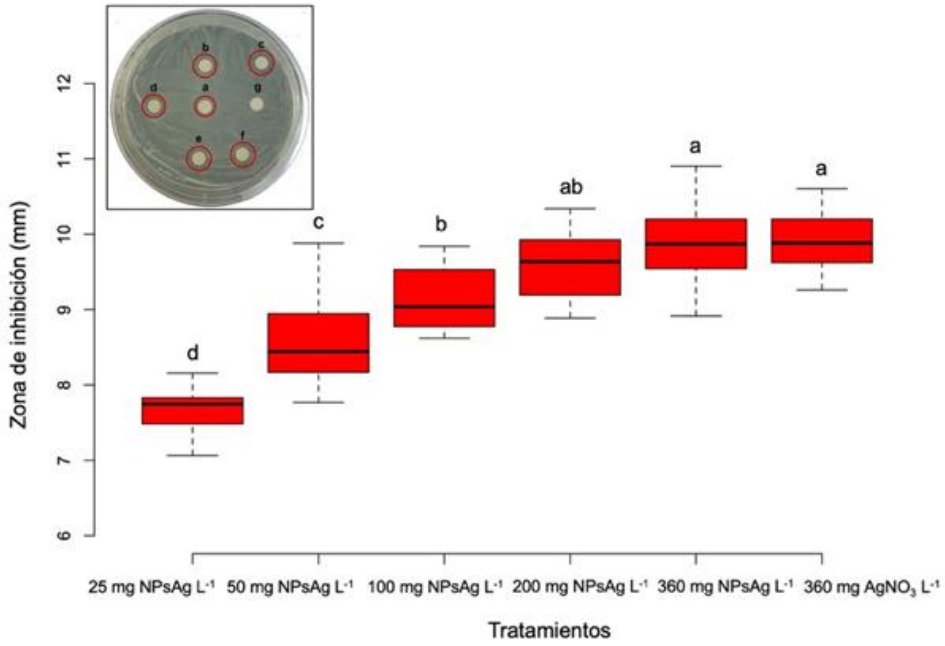


Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes de la actividad antibacteriana de NPsAg frente a *Erwinia amylovora*, mediante el método de difusión en disco de Kirby-Bauer. Inserto superior izquierdo. Tratamientos: a, 25 mg L^{-1}; b, 50 mg L^{-1}; c, 100 mg L^{-1}; d, 200 mg L^{-1}; e, 360 mg L^{-1}; f, 360 mg $AgNO_3$ L^{-1} (control positivo); g, agua desionizada (control negativo). Los círculos rojos, fuera de los discos (6 mm), delimitan la zona de inhibición de la bacteria. Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Las NPsAg sintetizadas con extractos de corteza de cedro rojo (*Cedrela odorata*) también demostraron ser eficaces para controlar el crecimiento del hongo *Fusarium circinatus*, uno de los patógenos más temidos en los viveros forestales, que provoca grandes pérdidas en *Pinus* spp. (**Fig. 10**) [9].

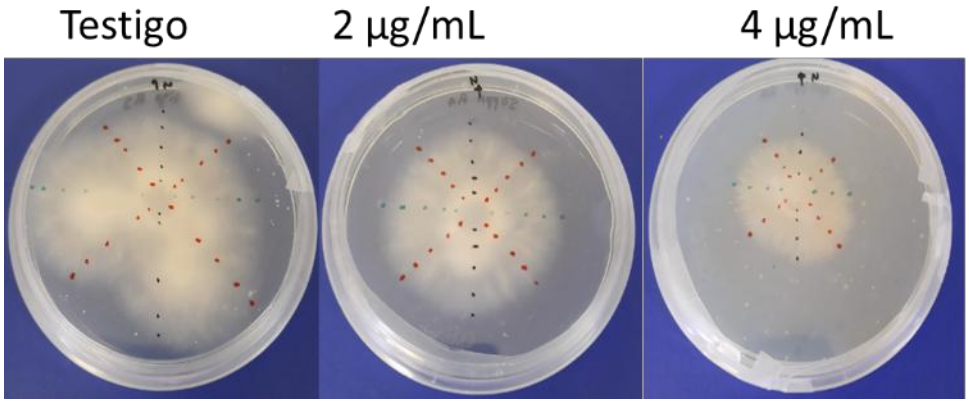


Figura 10. Actividad de NPsAg (2 µg/mL y 4 µg/mL) contra *Fusarium circinatus*, producidas a partir de extracto acuoso de corteza de *Cedrela odorata*, a los 5 d de incubación.

La NPsAg y los hongos micorrízicos

El hongo micorrízico *Rhizophagus intraradices* es tolerante a diferentes concentraciones de NPsAg al producir estructuras micorrízicas, como hifas y vesículas (**Fig. 11**).
En plantas de *Trebol repens* se presentó el efecto dosis-respuesta hormético: en dosis de 1 y 10 µg mL^{-1} de NPsAg se incrementó la colonización micorrízica arbuscular en 91.67 % y 95 % y el número de esporas. El aumento de la concentración de NPsAg a 100 µg mL^{-1}, redujo el porcentaje de colonización y número de esporas. En contraste, en *T. repens,* encontró que las raíces de *Trigonella foenum-graecum*, inoculadas con *Glomus intraradices* (ahora *Rhizophagus intraradices*), expuestas a dosis de 375 mg kg^{-1} de ZnO NPs la colonización se redujo, pero en concentraciones más altas la colonización aumentó [10].

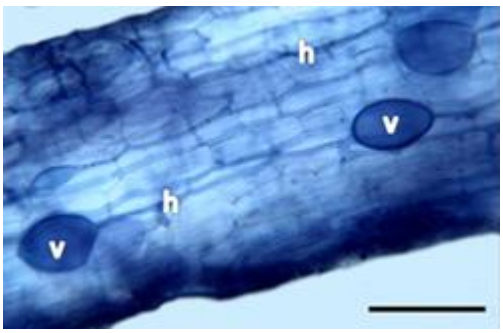


Figura 11. Colonización por el hongo micorrízico arbuscular (HMA) Rhizophagus intraradices en las raíces de trébol (Trifolium repens) en presencia de 10 µg mL^{-1} de NPsAg. barra = 75 µm.

Efecto de la NPsAg en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae*

La evaluación de la exposición de *Azolla-Anabaena azollae* a NPsAg en un rango de 5.0 a 100 mg NPsAg L^{-1} durante 8 días arrojó los siguientes resultados. En la medida en que aumentó la concentración de NPsAg, las raíces se oscurecieron y las raíces en crecimiento se acortaron. (**Fig. 12 a, d, g**). Con 5 mg de NPsAg L^{-1}, la membrana celular y el citoplasma de las células de la corteza se obliteran parcialmente; además, la endodermis y el cilindro vascular presentan depósitos oscuros (**Fig. 12 b, c**). La exposición a 10 mg de NPsAg L^{-1} promovió la aparición de depósitos granulares y oscuros en las células de la corteza, la endodermis, el periciclo y el tejido vascular (**Fig. 12 e, f**). Las raíces expuestas a 100 mg de NPsAg L^{-1}, presentaron daños severos: el cilindro vascular se colapsó totalmente, las células corticales se obliteraron parcialmente y la rizodermis se mostró desorganizada y rota (**Fig. 12 h, i**).

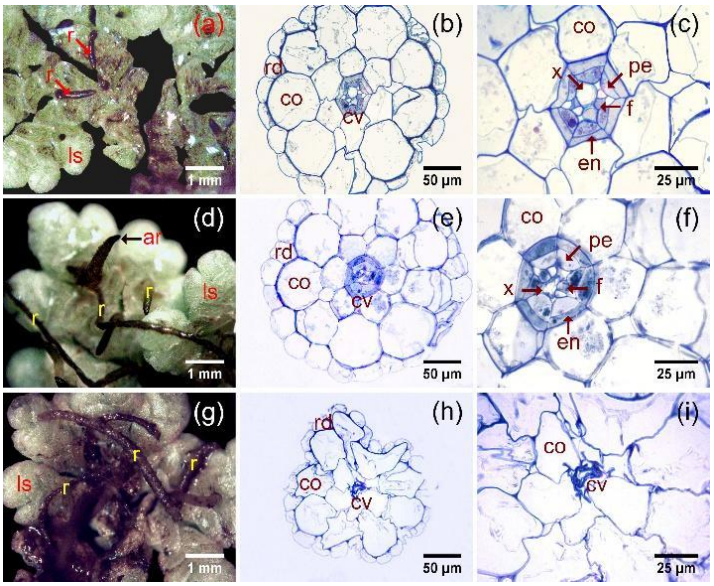


Figura 12. Efecto de 5.0 - 100.0 mg de NPsAg L^{-1} en la morfología y estructura radical de *A. filiculoides*, expuesta por 8 días. 5 mg de NPsAg L^{-1} (a-c); 10 mg de NPsAg (d-f); 100 mg de NPsAg L^{-1} (g-i). Morfología (a, d, g) y cortes transversales (1 µm) teñidos con 1% de azul de metileno y 1% de Azure en bórax (1%) (b, c, e, f, h, i). Ápice de la raíz (ar), cilindro vascular (cv), corteza (co), endodermis (en), lóbulo sumergido (ls), periciclo (pe), raíz (r), rizodermis (rd), floema (f), xilema (x).

Técnicas de Microscopía Electrónica de alta resolución y EDS permitieron encontrar hallazgos novedosos que indican que muchas NPsAg se acumulan sobre la rizodermis, luego estas se disocian en iones de plata (Ag^{+}) para entrar a la raíz y pasar por la corteza, acumulándose mayormente en la endodermis, donde forman nuevas NPsAg [8].

La exposición a concentraciones crecientes de NPsAg aumentó significativamente la concentración de Ag en los tejidos del simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae*. La concentración máxima de 13.43 mg g^{-1} de biomasa seca (BS) se registró con 10 mg de NPsAg L^{-1}. En contraste, al exponer el simbiosistema a 100 mg de NPsAg L^{-1}, la concentración de Ag descendió a 9.32 mg g^{-1} de BS. Este hallazgo se atribuye al daño severo del tejido vascular observado a esta concentración (**Fig. 13**).

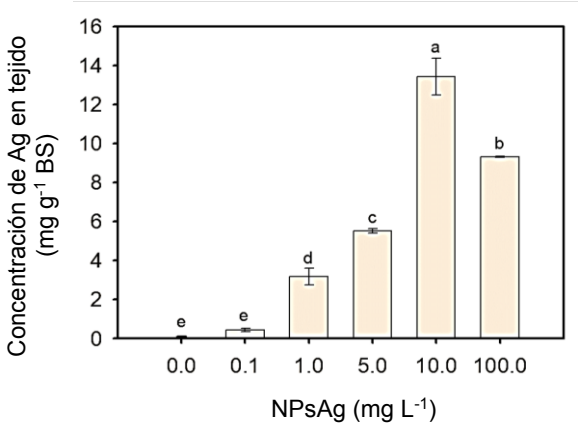


Figura 13. Concentración de Ag en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* expuesto a concentraciones crecientes de NPsAg durante 8 días. Las medias ± EE con letras diferentes sobre

las barras indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n=3. BS: biomasa seca.

CONCLUSIONES

La síntesis verde es un método rápido, ecológico y sencillo que utiliza recursos naturales locales y de bajo costo, con amplia aplicación en la agricultura. La síntesis de NPsAg asistida con extractos de plantas como *Camellia sinensis, Tagetes erecta* y *Cedrela odorata* es eficiente para producir partículas casi esféricas de tamaño inferior a 100 nm. Los estudios en los extractos acuosos han demostrado la presencia de moléculas reductoras, como fenoles, terpenos y terpenoides, que actúan como buenos reductores de los Ag+ bajo la acción de la energía solar, la cual actúa como catalizador del proceso. En la aplicación agrícola, estas nanopartículas demostraron ser eficaces frente a bacterias fitopatógenas como *Erwinia amylovora* y al hongo fitopatógeno *Fusarium circinatus.* Los experimentos *in vitro* demuestran que las NPsAg pueden ser efectivas a bajas concentraciones.

Esta investigación demostró que las NPsAg en soluciones florero con ácido cítrico, que baja el pH a 5, disminuyen la carga bacteriana en los floreros y limitan que dichas bacterias bloqueen los haces vasculares de los tallos florales, mientras que la acides que confiere el ácido cítrico favorece la absorción de agua.

Respecto al impacto ambiental, en nuestro estudio, el simbiosistema de agua dulce, *Azolla-Anabaena azollae*, que es una planta modelo para estudios de bio-remediación, que respaldan la hipótesis de que no todas las NPsAg entran a la raíz: la mayoría se depositan en la superficie de la rizodermis, de donde se disocian en iones Ag^{+}, los cuales ingresar a la corteza y se acumulan en la endodermis para formar nuevas NPsAg que podrían liberar nuevos iones Ag^{+} y entrar al sistema vascular. El daño principal se debe al colapso completo del cilindro vascular, observado a altas concentraciones (100 mg de NPsAg L^{-1}), lo que provocó un descenso de la translocación de Ag+, reflejado en una reducción de la acumulación de plata (Ag) a 9.32 mg g^{-1} de BS. Este efecto se reflejó en un menor crecimiento, un oscurecimiento de la planta y una reducción de su capacidad de bioacumulación de plata.

La aplicación de las NPsAg en la agricultura es un campo fértil y prometedor, pero el impacto de estas partículas en el medio ambiente parece depender de la concentración; no obstante, hacen falta muchos estudios para conocer con certeza su efecto sobre la biota del planeta.

BIBLIOGRAFÍA

1. S Iravani, H Korbekandi, SV Mirmohammadi, B Zolfaghari. “Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods” Res. Pharm. Sci. Vol. 9, 6, 2014, pp. 385-406. PMID: 26339255; PMCID: PMC4326978.
2. K. Kourani and A. Krishnakumar, “Applications of Green Synthesized Nanoparticles in Agriculture,” in *Green Nanotechnology Applications for Ecosystem Sustainability* (Springer, Cham, 2025). doi: 10.1007/978-3-031-90766-1_3.
3. J. Zárate-Escobedo, H. A. Zavaleta-Mancera, R.M. Soto-Hernández, P. Pérez-Rodríguez, A.R. Vilchis-Néstor, H.V. Rojas y L.I. Trejo-Téllez. “Long-Lasting Silver Nanoparticles Synthesized with *Tagetes erecta* and Their Antibacterial Activity against *Erwinia amylovora*, a serious Rosaceous pathogen,” Plants, Vol. 13, 7, 2024, pp. 981- 999. doi: 10.3390/plants13070981.
4. SADER. Panorama agroalimentario de 2025. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Coordinación General de Información, Inteligencia y Evaluación, Dirección General de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México. 2025.
5. A. Ashraf, S. Hussain, U. e. Rubab, M. Saeed, N. I. Raja, and Z. ur R. Mashwani, “Green-Synthesized Nanoparticles as Bio-stimulants to Achieve Zero Hunger: A Sustainable Approach to Enhancing Growth and Productivity in Agriculture,” Bionanoscience, Vol. 15, 3, 2025, pp. 521. doi: 10.1007/s12668-025-02108-w.

6. C. Salas-Solís V., A. Zavaleta-Mancera, M. de L. Arévalo Galarza, L. M. Carrillo-López, and M. Luna-Cavazos, “Sacarosa y ácido cítrico en soluciones con nanopartículas de plata, en la vida florero de rosa,” Agrociencia, Vol. 52, 7, 2018, pp. 951-965.
7. L.M. López-Carrillo, R.M. Soto-Hernández, H. A. Zavaleta-Mancera, et al. “Study of the performance of the organic extracts of *Chenopodium ambrosioides* for Ag nanoparticle synthesis”. J. Nanomaterials. August, ID 4714162, 2016, pp.1-13 doi.org/10.1155/2016/4714162.
8. A. López-Herrera, M. Avalos-Borja, J.R. García-Nava, L.I. Trejo-Téllez, A. Alejandro, A. Patrón-Soberano, V. Conde-Martínez, H.A. Zavaleta-Mancera. “Interaction of silver nanoparticles with the aquatic fern *Azolla filiculoides*: root structure, particle distribution, and silver accumulation” J. Nano. Res., Vol. 23, 13, 2021, pp.1-15. doi.org/10.1007/s11051-020-05120-1.
9. C. Vicencio-Salas Solís, H. A. Zavaleta-Mancera, S. E. García-Díaz, R. García-Nava, L. I. Trejo-Téllez, and A. Robledo-Paz, “Green synthesis of silver nanoparticles using *Cedrela odorata* and their fungicidal activity against *Fusarium circinatum*,” J. Nanoparticle Res., Vol. 26, 164, 2024, pp. 1-15. doi: 10.1007/s11051-024-06029-9.
10. N. G. Siani, S. Fallah, L. R. Pokhrel y A. Rostamnejadi, “Natural amelioration of zinc oxide nanoparticle toxicity in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) by arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) secretion of glomalin”, Plant Physiol. Biochem., Vol. 112, 3, 2017, pp. 227-238.

VALORACIÓN DE PARÁMETROS AGRONÓMICOS EN NUEVAS VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR

Jazmin Lavin-Castañeda[1]; Fernando Carlos Gómez-Merino[2]*; Eréndira Esmeralda Hernández-Andrade[2]; Libia Iris Trejo-Téllez[2], Heli Aníbal López-Rosano[2]

[1]Colegio de Posgraduados Campus Veracruz. [2]Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. fernandg@colpos.mx

RESUMEN

En México, la caña de azúcar se cultiva en 15 entidades federativas, y Veracruz es el principal estado productor; para el cierre de la zafra 2023/2024, el volumen de producción nacional fue de 4.7 millones de megagramos (Mg). México ocupa el sexto lugar entre los países productores de este cultivo agroindustrial, lo que posiciona a la cadena de valor como un importante pilar económico para el país. A pesar de ello, el desarrollo de tecnologías que permitan enfrentar retos como el cambio climático aún es insuficiente. Asimismo, la desaparición del Instituto Mexicano para la Producción Azucarera (IMPA) a inicios de la década de 1990 ha impactado la generación de nuevas variedades comerciales con mayor resiliencia a factores de estrés biótico y abiótico, ya que durante aproximadamente 50 años el campo mexicano ha estado sustentado principalmente por tres variedades: CP 72-2086, Mex 69-290 y Mex 79-431. Por ello, es necesaria la implementación de innovaciones tecnológicas que contribuyan a mejorar el rendimiento y la calidad de la producción cañera de manera sustentable. En este trabajo se analizó el comportamiento de 20 nuevas variedades de caña de azúcar en fase semicomercial (ciclo soca): Mex 09-29, Mex 09-50, Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-95, Mex 09-97, Mex 09-125, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-217, Mex 09-222, Mex 09-279, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, Mex 09-341 y Mex 09-348, así como cuatro testigos comerciales. Se evaluó la altura de tallos (AT) y número de entrenudos (NENTR). El diseño experimental fue de bloques completamente al azar y los datos obtenidos se analizaron mediante correlación de Pearson para determinar la asociación entre ambas variables en las 24 variedades evaluadas. Los resultados mostraron una correlación positiva entre la altura de tallos y el número de entrenudos (r = 0.69). Se concluye que ambas variables presentan una asociación positiva fuerte, por lo que el incremento en una de ellas tiende a estar acompañado por el incremento de la otra. Estos atributos pueden constituir criterios útiles para la caracterización agronómica y la selección de materiales promisorios dentro de programas de mejoramiento genético.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) constituye uno de los cultivos agroindustriales más importantes a nivel mundial debido a su contribución a la producción de azúcar, bioenergía y diversos subproductos de valor agregado. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima que la producción mundial de azúcar alcanzará 185.3 millones de toneladas durante el ciclo 2025/2026, lo que representa un incremento de 9.7 millones de toneladas respecto al ciclo anterior, equivalente a un crecimiento de 5.5 %. Asimismo, se prevé que el consumo mundial alcance 180.2 millones de toneladas, reflejando la importancia económica y alimentaria de esta agroindustria a escala global (FAO, 2025).

En México, la agroindustria de la caña de azúcar continúa siendo una actividad estratégica para el sector agrícola y para el desarrollo económico de diversas regiones productoras (CONADESUCA, 2026). Según el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2026) y el Departamento de Agricultura de los estados Unidos (USDA, 2026), los rendimientos de este cultivo han venido a la baja, de 78.7 Mg ha^{-1} en la zafra 2012-2013, a 62.1 Mg ha^{-1} en la zafra 2024-2025. Estas cifras evidencian la urgente

necesidad de incrementar la productividad del cultivo mediante estrategias que permitan mejorar su rendimiento, estabilidad y adaptación a diferentes condiciones ambientales. A pesar de la importancia económica y social de la agroindustria cañera, gran parte de la producción continúa sustentándose en un número relativamente reducido de variedades comerciales. Esta situación incrementa la vulnerabilidad del sistema productivo frente a plagas, enfermedades, estrés hídrico y otros factores asociados al cambio climático. En este contexto, los programas de mejoramiento genético desempeñan un papel fundamental en la generación de nuevas variedades con características agronómicas superiores, capaces de mantener altos niveles de productividad y calidad industrial bajo condiciones ambientales variables (Gómez-Merino *et al*., 2014).

La evaluación de atributos morfológicos constituye una herramienta ampliamente utilizada dentro de los programas de mejoramiento genético de caña de azúcar. Estos caracteres permiten describir, diferenciar y seleccionar materiales con potencial agronómico, además de aportar información útil sobre el crecimiento y desarrollo de los genotipos evaluados. Diversos estudios han señalado que los caracteres relacionados con el tallo poseen especial importancia debido a que este órgano representa la principal estructura de interés económico del cultivo, al ser el sitio donde se acumula la sacarosa destinada a la producción de azúcar y otros derivados industriales (Sinclair *et al*., 2005).

Entre los atributos morfológicos más relevantes destacan la altura de tallos y el número de entrenudos. La altura de tallos constituye un indicador del crecimiento vegetativo y refleja la interacción entre factores genéticos y ambientales que regulan el desarrollo de la planta. Por su parte, el número de entrenudos representa un componente estructural directamente relacionado con la arquitectura del tallo y su crecimiento longitudinal. Se han reportado asociaciones positivas entre ambos caracteres en variedades de caña de azúcar, sugiriendo que el incremento en el número de entrenudos favorece el crecimiento total del tallo (Khonghintaisong *et al*., 2023). Se ha destacado la utilidad de estos atributos para la caracterización de germoplasma y la identificación de materiales con potencial productivo (Sumbele *et al*., 2021). Asimismo, Sukhchain *et al*. (1997) señalaron que los caracteres asociados al tallo constituyen componentes importantes en la evaluación de genotipos de caña de azúcar, mientras que Tena *et al*. (2016) destacaron la utilidad de la altura de tallo y del número de entrenudos como criterios de selección dentro de programas de mejoramiento genético. La comprensión de las relaciones existentes entre estos atributos puede contribuir a fortalecer los procesos de selección y evaluación de nuevas variedades, facilitando la identificación de materiales con características agronómicas favorables. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la relación existente entre la altura de tallos y el número de entrenudos en nuevas variedades de caña de azúcar en fase semicomercial mediante un análisis de correlación de Pearson.

TEORÍA

La altura de tallos constituye uno de los principales indicadores del crecimiento vegetativo en caña de azúcar. Esta variable es el resultado de la interacción entre factores genéticos y ambientales que regulan la elongación celular y el desarrollo de los entrenudos. Por su parte, el número de entrenudos representa un atributo estructural importante, ya que cada entrenudo contribuye al crecimiento longitudinal del tallo. La formación y elongación de entrenudos son procesos directamente relacionados con la actividad meristemática y la capacidad de crecimiento de la planta.

Diversos estudios han documentado una asociación positiva entre la altura de tallos y el número de entrenudos. Correlaciones positivas entre ambas variables en variedades de caña de azúcar, sugiriendo que el incremento en el número de entrenudos favorece el crecimiento total del tallo (Khonghintaisong *et al*., 2023). Debido a ello, ambos atributos son considerados variables de interés en programas de evaluación y selección varietal.

El tallo constituye el principal órgano de interés económico en caña de azúcar debido a que en él se acumula la sacarosa destinada a la producción de azúcar y otros derivados industriales. Sinclair et al. (2005) señalaron que gran parte del volumen del tallo se concentra en los entrenudos inferiores

y que el crecimiento del tallo ocurre mediante la incorporación de nuevos entrenudos y el incremento en tamaño de los ya existentes. Asimismo, Sumbele *et al*. (2021) indicaron que la altura de planta, altura de tallo, longitud de entrenudos y grosor de entrenudos son caracteres útiles para la caracterización de germoplasma y la selección de materiales con potencial productivo. De igual forma, Tena *et al*. (2016) destacaron la importancia de la altura de tallo y el número de entrenudos como caracteres agronómicos de interés dentro de los programas de mejoramiento genético de caña de azúcar.

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, ubicado en la Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348.5, congregación Manuel León, municipio de Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, a una altitud aproximada de 650 m.

Se trabajó con 20 variedades de caña de azúcar en fase semicomercial (Ciclo Soca): Mex 09-29, Mex 09-50, Mex 09-66, Mex 09-93, Mex 09-95, Mex 09-97, Mex 09-125, Mex 09-132, Mex 09-208, Mex 09-212, Mex 09-217, Mex 09-222, Mex 09-273, Mex 09-289, Mex 09-290, Mex 09-312, Mex 09-321, Mex 09-333, Mex 09-341 y Mex 09-348. Asimismo, se incluyeron cuatro variedades comerciales utilizadas como testigo: CP 72-2086 y Mex 05-204 de maduración temprana, Mex 79-431 de maduración intermedia y Mex 69-290 de maduración tardía.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar. Cada parcela experimental estuvo constituida por cinco surcos de 6 m de longitud, con una distancia de 1.20 m entre surcos y una separación de dos metros entre parcelas.

Las variables evaluadas fueron altura de tallos y número de entrenudos. La altura de tallos se determinó desde la base de la planta hasta el último collar visible utilizando un flexómetro. El número de entrenudos se contabilizó desde la base del tallo hasta el último collar visible.

Para determinar la asociación entre la altura de tallos y el número de entrenudos se realizó un análisis de correlación de Pearson. El análisis estadístico se realizó en el software R versión 4.3.2 (R Core Team, 2024).

RESULTADOS

El análisis de correlación de Pearson mostró una asociación positiva fuerte entre la altura de tallos (AT) y el número de entrenudos (NENT), con un coeficiente de correlación de **r = 0.69** (**Figura 1**).

0.69	0.27	0.16	-0.04	0.37	0.12	0.03	AT
1.00	0.11	0.17	-0.10	0.14	-0.34	0.01	
0.11	1.00	0.34	0.15	0.13	-0.11	-0.12	
0.17	0.34	1.00	0.02	-0.09	-0.21	0.04	
-0.10	0.15	0.02	1.00	0.40	0.17	0.06	
0.14	0.13	-0.09	0.40	1.00	0.42	0.00	
-0.34	-0.11	-0.21	0.17	0.42	1.00	0.22	
0.01	-0.12	0.04	0.06	0.00	0.22	1.00	
NENT							

Figura 1. Correlación de Pearson entre altura de tallos (AT) y número de entrenudos (NENTR) en 24 variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) evaluadas en fase semicomercial (Ciclo Soca) en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

La correlación observada indica que las variedades con mayor altura tendieron a presentar un mayor número de entrenudos. Este comportamiento coincide con lo reportado por Khanna *et al*. (1955), quienes encontraron una correlación positiva de r = 0.73 entre ambas variables en diferentes variedades de caña de azúcar.

La asociación positiva observada puede explicarse por el papel que desempeñan los entrenudos en el crecimiento longitudinal del tallo. Sinclair *et al*. (2005) reportaron que el crecimiento del tallo ocurre mediante la incorporación de nuevos entrenudos y el incremento en tamaño de los ya existentes, contribuyendo al aumento de la altura total de la planta. En concordancia, Botha *et al*. (2023) señalaron que el incremento en la altura de la planta está controlado por la elongación de los entrenudos superiores del tallo y que el crecimiento del culmo depende principalmente de la expansión de los cinco a siete entrenudos más jóvenes.

Además de su importancia fisiológica, ambos caracteres poseen relevancia agronómica. Sukhchain *et al*. (1997) señalaron que el número de entrenudos constituye un componente importante dentro de la evaluación de genotipos de caña de azúcar, mientras que la longitud del tallo mostró asociaciones positivas con características relacionadas con los entrenudos. De manera complementaria, Sumbele *et al*. (2021) observaron que la altura de planta, altura de tallo y características asociadas a los entrenudos constituyen atributos útiles para la caracterización de germoplasma y la selección de materiales promisorios. Asimismo, Tena *et al*. (2016) reportaron que la altura de tallo y el número de entrenudos presentan utilidad como criterios de selección dentro de programas de mejoramiento genético.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que la altura de tallos y el número de entrenudos constituyen caracteres morfológicos estrechamente relacionados y de utilidad para la caracterización agronómica y evaluación de genotipos de caña de azúcar.

CONCLUSIONES

La altura de tallos y el número de entrenudos presentaron una correlación positiva fuerte (r = 0.69), lo que indica una asociación estrecha entre ambas variables en las variedades de caña de azúcar evaluadas. Los resultados indican que el incremento en el número de entrenudos contribuye al crecimiento longitudinal de los tallos y que ambos atributos pueden emplearse como criterios agronómicos complementarios en programas de evaluación y selección varietal. La medición de estas variables representa una alternativa práctica, rápida y de bajo costo para la caracterización inicial de materiales genéticos de caña de azúcar.

BIBLIOGRAFÍA

1. CONADESUCA “Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar”. Reporte de avance de producción de caña y azúcar. Semana 24 del ciclo azucarero 2025/26. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Ciudad de México, México, 2026.
2. E. Tena, F. Mekbib, A. Ayana, “Heritability, correlation and path coefficient analysis among cane yield and sugar yield components in sugarcane”, Am. J. Plant Sci., Vol. 7, 2016, pp. 1496-1506.
3. DOF “Diario Oficial de la Federación”, Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2026-2030. https://sidof.segob.gob.mx/notas/5787689
4. F. C. Botha, G. Scalia, A. Marquardt, K. Wathen-Dunn, “Sink strength during sugarcane culm growth: size matters”. Sugar Tech, Vol. 25, 5, 2023, pp. 1047-1060.
5. F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, H. E. Sentíes-Herrera, “Sugarcane as a novel biofactory: Potentialities and Challenges”. En: Guevara-González, R.; Torres-Pacheco, I. (eds.).

Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI. Springer, Cham, 2014, pp. 129-149.
6. FAO “Food and Agriculture Organization of the United Nations”. Food Outlook. Biannual Report on Global Food Markets. Sugar: Markets at a Glance. November 2025. Roma, Italia, 2025.
7. J. Khonghintaisong, P. Songsri, N. Jongrungklang, “Comparison of physiological, anatomical, and morphological traits between sugarcane hybrids and their parents with different stalk dry weights in the early growth stage under hydroponic conditions”, Agriculture,13, 2023, 2234.
8. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024.
9. S. A. Sumbele, E. E. Fonkeng, P. Akongte, C. N. Ndille, A. Henry, “Characterization of sugarcane germplasm collection and its potential utilization for evaluation of quantitative traits”, Afr. J. Agric. Res., Vol. 17, 2, 2021, pp. 273-282.
10. Sukhchain, D. Sandhu, G. S. Saini, “Inter-relationships among cane yield and commercial cane sugar and their component traits in autumn plant crop of sugarcane”, Euphytica, Vol. 95, 1997, pp. 109-114.
11. T. R. Sinclair, R. A. Gilbert, R. E. Perdomo, J. M. Shine, G. Powell, G. Montes, “Volume of individual internodes of sugarcane stalks”. Field Crops Res., Vol. 91, 2-3, 2005, pp. 207-215.
12. USDA “US Department of Agriculture”, Mexico’s Sugar Outlook. https://ers.usda.gov/sites/default/files/_laserfiche/outlooks/114173/SSS-M-453.pdf?v=46551

CONSUMO RELATIVO DE FIBRA DE AGAVE EN OVINOS UTILIZANDO UN MÉTODO DE CAFETERÍA

Marisol Escalante-Gómez, Diana Angélica Gutiérrez-Arenas, Servando Reyes-Castro, Fidel Avila-Ramos, Alicia del Rosario Martínez-Yáñez, Mauricio Valencia-Posadas.

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, División de Ciencias de la Vida.
diana.gutierrez@ugto.mx.

RESUMEN

En la nutrición animal es común el uso de alimentos convencionales (cereales y pastas de oleaginosas, principalmente); sin embargo, el aumento del costo de dichos ingredientes da pauta para la implementación de alimentos no convencionales, los cuales representan una fuente importante de biomasa (Ajila *et al*., 2012, Delgadillo *et al*., 2015). Actualmente se han estudiado ingredientes no convencionales como los subproductos agroindustriales, entre ellos, las hojas o bagazo de Agave los cuales pueden contribuir a minimizar la contaminación ambiental. Por tal motivo se llevaron a cabo un par de ensayos, en los que se utilizaron cuatro ovinos cruza Dorper x Katahdin destetados de 19 ± 0.6 kg de peso vivo. Se alojaron en corrales individuales y recibieron una dieta base de adaptación durante siete días antes de iniciar el primer ensayo. Posterior a la adaptación se proporcionó 1.6 kg día^{-1} de dieta base (9.6% de Proteína cruda y 0.9 Mcal kg alimento^{-1}) durante 15 d y adicionalmente 200 g de harina de hoja de *Agave tequilana* Weber var. azul (FHA*t*), este último durante un periodo de cuatro h de las 7:00 h a las 11:00 h y posteriormente se proporcionó la dieta base a las 15:00 h. Posterior al primer ensayo, se replico éste solo con la variante de adición de melaza a la FHA*t*, para ambos ensayos se midió el consumo en g de FHA*t* y FHA*t* +melaza. Se analizaron los datos de consumo por cada repetición, se determinó la media, mínimos, máximos y total de consumo mediante el programa estadístico statgraphics (centurion18 – X64). Se determinó el valor nutrimental de la FHA*t* y se obtuvieron valores de 5.14% de Proteína Cruda, semejantes o ligeramente superiores a los del rastrojo de maíz lo que hace a la FHA*t* una opción viable sobre todo en épocas en las que sube de precio el rastrojo. El consumo mínimo de FHA*t* fue de 0 g, mientras que el máximo consumo fue de 16 g, consumos relativamente bajos los cuales pueden deberse al tamaño de partícula y a la presencia de metabolitos secundarios como las saponinas que pueden afectar el consumo del ingrediente. Cuando se agrega melaza como aditivo, se observan consumos hasta de 36 g. La harina de hoja de agave presenta un bajo consumo, lo cual podría verse relacionado a las características propias del alimento (palatabilidad y alto contenido polvoso) lo que la hace poco apetecible para los ovinos, los cuales son selectivos con el alimento que consumen, debido a esto se requiere mejorar las características de FHA*t* o implementar el uso de aditivos que mejoren su aceptación por parte del animal, sin embargo se vuelve una opción viable sobre todo en épocas difíciles para el productor.

INTRODUCCIÓN

Los alimentos no convencionales se caracterizan por su bajo valor económico, baja competitividad en términos de consumo humano y disponibilidad durante la época de estiaje, además existen diversas fuentes de las cuales se pueden obtener, como los subproductos de cultivos de cereales, tubérculos, hojas de árboles, cáscaras de vainas, pastos naturales, malezas y también se encuentran subproductos agroindustriales como los de la industria del azúcar y el tequila (hojas y bagazo de agave; Katoch y Tripathi, 2018). El aprovechamiento de estos subproductos puede ayudar a minimizar la contaminación ambiental (Ramírez-Cortina *et al*., 2018), llegando a crear nuevos productos alimenticios y utilizarlos de manera directa como ingredientes en la alimentación de rumiantes (Ajila *et al*., 2012).

Las hojas y el bagazo de Agave son subproductos agroindustriales, los cuales actualmente no son aprovechados por la industria tequilera, al no ser aprovechados pueden provocar contaminación al ser vertidos ilegalmente en tierras agrícolas (Tadhani y Subhash, 2006). La utilización de las hojas de Agave como fuente no convencional de alimento puede representar una alternativa alimenticia debido a su gran adaptabilidad en diferentes hábitats y pueden sustituir algunos ingredientes de las dietas para rumiantes, llegando a disminuir los costos de producción y por lo tanto tener sistemas de producción más rentables (García-Herrera *et al*., 2010).

TEORÍA

Agave tequilana Weber var. Azul

Los agaves son plantas muy representativas de México, estas son consideradas dentro del grupo de plantas de zonas áridas. El género Agave pertenece a la familia de las Agavaceae las cuales poseen características representativas como, raíces muy ramificadas, forma característica de roseta, cutícula gruesa y hojas delgadas las cuales pueden llegar a pesar hasta 250 kg en estado fresco (Domínguez *et al*., 2008; Nava-cruz *et al*., 2014).

Producción tequilera en México

El tequila es una bebida regional obtenida de la destilación de jugo fermentado de agave. El cultivo de agave y la producción de tequila en México está regulada por el Consejo Regulador del Tequila, el cual se dedica a cumplir con la Norma Oficial Mexicana del Tequila, así como también salvaguardar la Denominación de Origen, la cual se describe en la Ley de la Propiedad Industrial (1991), dentro de esta denominación de origen para el tequila se encuentran algunas zonas de los estados de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas.

En México la cosecha de agave para la producción de tequila se realiza anualmente, para el 2019 en algunos de los estados con denominación de origen se tuvo un total de 18,190.80 hectáreas cosechadas.

Potencial forrajero de los subproductos de la producción tequilera

De acuerdo con Iñiguez-Covarrubias *et al*. (2001), la biomasa total de una planta de *Agave tequilana* se compone aproximadamente de 54% piña y 46% hojas. En términos productivos, Frías-Hernández (2009), menciona que una planta puede generar en promedio una piña de 60 kg y alrededor de 50 kg de hojas. Considerando densidades de siembra que oscilan entre 2,300 y 2,500 plantas por hectárea en la zona Centro de México, o incluso llegar hasta las 5,000 plantas (INEGI, 2007), es posible estimar una producción cercana a 125 ton por hectárea de hojas de agave bajo una densidad promedio de 2,500 plantas por hectárea. Esta cantidad de biomasa representa un indicador relevante de los subproductos generados por la industria tequilera, cuya constante expansión incrementa la cantidad de residuos agrícolas disponibles.

Lejos de considerarse como desechos industriales, pueden valorizarse como una fuente de carbohidratos estructurales para la alimentación animal. Estos subproductos pueden constituir una alternativa viable como forraje, sobre todo en lugares con limitada producción agrícola, como las zonas semiáridas, ya que los agaves son plantas que tienen alta eficiencia en el uso del agua y además se adaptan a condiciones adversas (Pérez *et al*., 2017).

PARTE EXPERIMENTAL

Valor nutricional de la Hoja de Agave tequilana Weber var. Azul

Previo al inicio de los ensayos sé determinó la composición nutrimental de FHA*t*. Para ello, se realizaron análisis de humedad, extracto etéreo (grasa), cenizas, fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA) y proteína cruda. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 10. Análisis químico proximal de la fibra de hoja de *Agave tequilana* Weber var. azul.

Compuesto	Materia Fresca (%)	Materia Seca (%)
Materia seca (MS)	94.20	94.20
Materia Orgánica	78.40	83.20
Cenizas	15.80	16.80
Fibra detergente neutra (FDN)	42.00	44.60
Fibra detergente acida (FDA)	32.00	34.00
Extracto etéreo	1.09	1.16
Proteína cruda	4.84	5.14
Carbohidratos no fibrosos	30.40	32.30
Energía Digestible (Mcal/kg)	2.89	2.89

La FHA*t* comparada con el rastrojo de maíz puede ser una opción viable de forraje, ya que las características que presenta son semejantes o ligeramente superiores a los del rastrojo de maíz, lo que la hace una opción viable sobre todo en épocas en las que sube de precio el rastrojo.

Prueba de cafetería (ensayo 1)

Para el primer ensayo de la prueba de cafetería, se utilizaron cuatro ovinos cruza Dorper x Katahdin alojados en corrales individuales, los cuales tuvieron un peso vivo promedio de 19 ± 0.6 kg.

Previo al inicio del experimento, los ovinos recibieron una dieta base (Cuadro 2) de adaptación durante siete días. Concluido este periodo, durante los 15 días posteriores, se ofrecieron 200 g de FHA*t*, diariamente entre las 7:00 h y las 11:00 h y posteriormente a las 15:00 h, se proporcionó la dieta base (1.6 kg día^{-1}), la cual contenía 9.6% de Proteína cruda y 0.9 Mcal kg^{-1} de alimento.

Cuadro 2. Dieta de mantenimiento (dieta base) para ovinos.

Ingrediente	%
Pasta de soya	19.05
Ensilado de maíz	78.96
$CaCo_3$ (38%)	0.79
Premezcla de vitaminas y minerales*	1.00
Sal	0.20
Total	100.00
Aporte nutricional calculado (%)	
EM (Mcal/kg)	0.909
PC	9.600
Ca	0.510
P	0.234

*contenido de premezcla de vitaminas y minerales, Lapisa: Fósforo (12%), Calcio (13%), Cloro (15.60%), Sodio (10.40%), Magnesio (0.60%), Azufre (0.30%), Hierro (0.30%), Manganeso (0.12%), Zinc (0.12%), Cobre (0.03%), Cobalto (50.00 ppm), Iodo (30.00 ppm), Selenio (3.00 ppm).

Se determinó el consumo de FHA*t* de cada animal, restando la cantidad de FHA*t* rechazada a la FHA*t* ofrecida diariamente.

Prueba de cafetería (ensayo 2)

Para la segunda fase experimental, se utilizaron los mismos cuatro ovinos Dorper-Katahdin ya con un peso vivo inicial promedio de 21±0.25 kg, se les ofrecieron 50 g de FHA*t* adicionada con melaza al 6%, de acuerdo a lo reportado por la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA, 2019), con el fin de aumentar la gustocidad y disminuir el contenido polvoso. Por cada unidad de melaza se agregó media de agua, para facilitar su integración al ingrediente, el tratamiento se ofreció simultáneamente a las cuatro repeticiones de 8:00 am a 12:00 am, posteriormente a las 4:00 pm se proporcionó la dieta base (Cuadro 2).

Se determinaron los consumos del ingrediente de manera semejante al primer ensayo. Ambos resultados se analizaron por medio del programa estadístico Statgraphics (centurion18 – X64), se obtuvieron las medidas de tendencia central (media, mínimos, máximos), desviación estándar y los promedios totales de cada tratamiento.

RESULTADOS

Los resultados del primer ensayo se encuentran en el Cuadro 3. El peso vivo inicial de los ovinos osciló entre 18.2 y 19.7 kg, mientras que el peso final se encontró entre 21.2 y 21.8 kg. En todos los animales se observó un incremento de peso durante la fase experimental. El consumo total de FHA*t* presentó variación entre los animales, con valores de 0.57 a 1.57 g MS día^{-1}. El mayor consumo se registró en la repetición 4 (1.57 g MS día^{-1}).

De manera similar, el consumo de FHA*t* expresado en función del peso vivo varió entre 0.03 y 0.07 g MS día^{-1} y el menor consumo en la repetición 2 (0.57 g MS día^{-1}). El índice de consumo oscilo entre 0.30 y 0.83%. En cuanto al consumo de FHA*t* por kg de peso metabólico (g kg^{-1} PV$^{0.75}$) fluctuó entre 0.06 y 0.16 g kg^{-1} PV$^{0.75}$. En general, los resultados evidencian un bajo consumo de FHA*t* por parte de los ovinos durante el periodo de evaluación.

Cuadro 3. Consumo (g) de fibra de hoja de Agave tequilana weber var. Azul (FHA*t*) en ovinos.

	Repetición			
Variable	**1**	**2**	**3**	**4**
Peso inicial (kg)	18.2±0.59	19.5±0.59	19.5±0.59	19.7±0.59
Peso final (kg)	21.5±0.22	21.6±0.22	21.2±0.22	21.8±0.22
Consumo total FHA*t* (g MS/día)	0.75	0.57	1.07	1.57
Consumo total peso vivo (g MS/día PV)	0.04	0.03	0.05	0.07
Índice de consumo (%)	0.40	0.30	0.57	0.83
Consumo total FHA*t* *peso* metabólico (g^{-1} kg PV$^{0.75}$)	0.08	0.06	0.11	0.16

±EE. Error estándar.

Una vez obtenidos los resultados anteriores y observando los bajos consumos de FHAt se realizó una prueba rápida (cualitativa) para determinar la existencia de saponinas en la FHAt. Se realizó la prueba de espuma, la cual consiste en colocar 10 mL de agua destilada a 0.1 g de FHA*t* en tubos de ensayo, los cuales se agitaron de manera constante durante dos minutos para observar la presencia de espuma en la superficie del tubo, de acuerdo a Rodríguez *et al*., (2013), la aparición y permanencia de la espuma durante 15 minutos indica la presencia de saponinas. Los resultados obtenidos en esta fase cualitativa de saponinas de la FHAt, fueron positivos.

Los resultados del segundo ensayo, en el que la FHA*t* fue adicionada con melaza se presentan en el Cuadro 4. El peso vivo inicial de los ovinos osciló entre 21.2 y 21.8 kg, mientras que el peso final vario entre 28.0 y 28.7 kg, observándose una ganancia de peso en todos los animales durante el periodo experimental.

El consumo total, el consumo expresado por unidad de peso vivo, el índice de consumo y el consumo por kg de peso metabólico de FHA*t* tuvieron diferencias significativas (P≤ 0.05) entre las repeticiones. En general, la adición de melaza favoreció un mayor consumo de FHA*t* en comparación con el primero ensayo, aunque los índices de consumo continuaron siendo relativamente bajos.

Cuadro 4. Consumo (g) de fibra de hoja de *Agave tequilana* weber var. Azul (FHA*t*) adicionada con melaza en ovinos.

	Repetición			
Variable	1	2	3	4
Peso inicial (kg)	21.5±0.22	21.6±0.22	21.2±0.22	21.8±0.22
Peso final (kg)	28.7±0.27	28±0.27	28.5±0.27	28.2±0.27
Consumo total (g MS/día)	2.66^{x}	5.51^{y}	4.34^{xy}	4.09^{xy}
Consumo total peso vivo (g MS/día PV)	0.09^{x}	0.20^{y}	0.15^{xy}	0.15^{xy}
Índice de consumo (%)	5.41^{x}	11.19^{y}	8.81^{xy}	8.30^{xy}
Consumo total peso metabólico (g/Kg PV0.75)	0.21^{x}	0.45^{y}	0.35^{xy}	0.33^{xy}

x, y: Indica diferencia entre la misma fila

CONCLUSIONES

Los valores de consumo de la FHA*t* fueron bajos, lo cual puede deberse a un tamaño de partícula pequeño, además, se determinó la presencia de saponinas; las cuales presentan sabores amargos relacionándose a un bajo nivel nutricional o tóxico y por ende pueden afectar el consumo del alimento.

Al integrar la melaza al 6% se mejora la palatabilidad, pero al ser un ingrediente limitado tecnológicamente esta no logra mejorar las características de la FHA*t.*

A pesar de que existió un incremento cuatro veces mayor en el ensayo uno con respecto al dos se considera que la FHA*t* posee características que deben ser mejoradas y que puede dar pie a la realización de mayor investigación con este ingrediente no convencional.

BIBLIOGRAFÍA

1. C.M. Ajila, S.K. Brar, M. Verma, R.D. Tyagi, S. Godbout, J.R Valéro. Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. Critical Reviews in Biotechnology. 2012. pp 1–19.
2. C.R. Ramírez-Cortina, M.S. Alonso-Gutiérrez, L. Rigal, Valorización de Residuos Agroindustriales del Tequila Para Alimentación de Rumiantes. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2012, Vol. 18, 3, pp 449-457.
3. R. M. S. Domínguez, J. M. L. González, G. C. Rosales, V.C. Quiñones, D.L. Delgadillo, O. S. J. Mireles, M. B. E. Pérez. El cultivo *in vitro* como herramienta para el aprovechamiento,

mejoramiento y conservación de especies del género Agave. Investigación y Ciencia, 2008, 41, 53-62.
4. E. Lamy, F. Capela-e-Silva, A. Ferreira, E. S. Baptista, The influence of oral environment on diet choices in goats: A focus on saliva protein composition. In: Garrote D. E., and Andrade G.J., Goats: Habitat, breeding and management. Nova Science Publishers Inc., NY, USA, pp 93-111.
5. E. J. García-Herrera, S. J. Méndez-Gallegos, D. Talavera-Magaña. El género Agave spp. En México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. Revista salud pública y nutrición, 5. 2010. 109-129.
6. J. T. Frías-Hernández. Potencial y oportunidades de desarrollo de biocombustibles a partir de materiales no alimenticios en Guanajuato. Ide@s CONCYTEG, 2009, 4(54).
7. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA), Tablas FEDNA de composición y valor nutritivo de alimentos para la fabricación de piensos compuestos, 2019, Capitulo 4, pp 604.
8. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El cultivo del agave tequilero en Jalisco, Censo Agropecuario, 2007, 8(73). http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/agropecuario/2007/agricola/agave_teq/agaveteqjal.pdf (consultado el: 10/11/2020)
9. G. Iñiguez-Covarrubias, E.S. Lange, M.R. Rowell. Utilization of byproducts from the tequila industry: part 1: agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. Bioresource Technology, 2001, 77(1), 25–32.
10. M. Tadhani, R. Subhash, Preliminary studies on Stevia rebaudiana leaves: Proximal composition, mineral analysis and phytochemical screening. Journal of medical sciences, 2006, Vol. 6, 3, pp 321-326.
11. N. Y. Nava-Cruz, M. A. Medina-Morales, J. L. Martinez, R. Rodriguez, C. N. Aguilar. Agavebiotechnology: an overview. Critical Reviews in Biotechnology, 2014, 35(4), 546–559.
12. R.A. Pérez, O. A. Rodríguez, A. J. C. Nieto, H. J. Callejas, M. L. Portillo, Comparación de dos sistemas de siembra de maguey (Agave Salmiana), Universidad Politécnica de Francisco I. Madero, primera edición, 2017, 71.
13. R. Katoch, A. Tripathi, S. Sood, Possibilities of non-conventional feed resources in livestock feeding. Forage research. 2018. Vol. 44.3, pp 141-151.
14. R. Rodríguez, J.F. Jiménez, J.I. Del Real, E. Salcedo, J.F. Zamora, G. Íñiguez, Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 11. Compostaje de bagazo de agave crudo y biosólido provenientes de una planta de tratamiento de vinazas tequileras. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 2013, capítulo 29, pp 303-313.
15. R.L. Delgadillo, V.R. Bañuelos, I.E.L. Esparza, B.H. Gutiérrez, A.F.J. Cabral, R.A. Muro. Evaluación del perfil de nutrientes de bagazo de agave como alternativa de alimento para rumiantes. Rev Mex C Agríc. 11. 2015. pp 2099-2103.

PRESENCIA AMBIENTAL DE PARÁSITOS ZOONÓTICOS Y SU IMPACTO EN LA SALUD HUMANA

Francisca Chávez Ruvalcaba[1], Veronica Bañuelos Melero[1],María Alejandra Moreno García[2], Miguel Angel Jesús Salas Quezada[1], Aida Margarita Rodríguez Rodríguez[1], Rosalinda Gutierrez Hernández[1], Gustavo Raúl Reyna Martínez[3,] María Isabel Chávez Ruvalcaba[2]

[1]Licenciatura en Nutrición,Unidad Académica de Enfermería, UAZ, [2]Unidad Académica de Ciencias Biológicas, UAZ. [3]Facultad de Ciencias Químicas, UANL

charuva@uaz.edu.mx

RESUMEN

Las parasitosis zoonóticas representan un importante problema de salud pública debido a la contaminación ambiental por heces de animales, principalmente en espacios recreativos. El objetivo de este estudio fue identificar formas parasitarias presentes en muestras de tierra y pasto de parques urbanos en Zacatecas y Guadalupe. Se recolectaron más de 50 muestras de manera aleatoria, las cuales fueron analizadas mediante técnicas de decantación, centrifugación y sedimentación, seguidas de observación microscópica. Los resultados mostraron que aproximadamente el 78.5% de las muestras fueron positivas a estructuras parasitarias. El parásito predominante fue *Toxocara canis,* detectado tanto en huevos como en larvas, seguido de *Giardia spp., Trichuris vulpis, Dipylidium caninum y Ancylostoma caninum*. Se observó mayor presencia de formas parasitarias en muestras de suelo en comparación con pasto. El análisis estadístico evidenció diferencias significativas entre zonas y tipos de parásitos ($p < 0.05$). Se concluye que los parques urbanos representan un reservorio importante de parásitos zoonóticos, lo cual implica un riesgo para la salud humana, especialmente en población infantil. Estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer medidas de control sanitario, promover la tenencia responsable de mascotas y mejorar el mantenimiento de áreas públicas para reducir la exposición a estos agentes.

INTRODUCCIÓN

El sistema natural existe desde miles de millones de años antes de la aparición del ser humano y de las sociedades. Está integrado por componentes vivos (bióticos) y elementos no vivos (abióticos), los cuales sirven de soporte para el desarrollo de la vida[1].

La contaminación ambiental se define como la presencia de agentes físicos, químicos o biológicos, o de la combinación de estos, en cantidades y condiciones que resultan perjudiciales para la salud humana, así como para la flora y la fauna del entorno afectado. Conforme las actividades humanas se incrementan y las necesidades derivadas de la vida en sociedad evolucionan, el medio ambiente sufre mayores alteraciones[2].

La contaminación puede manifestarse en distintos niveles, como la contaminación del aire, del agua y del suelo, además de afectar a los seres vivos en general. En el caso del suelo, esta puede originarse por derrames en tanques de almacenamiento subterráneo, filtraciones provenientes de rellenos sanitarios, acumulación de residuos industriales, desechos orgánicos de rastros como grasa, sangre y pelo, residuos hospitalarios y el uso excesivo de pesticidas, plaguicidas e insecticidas en actividades agrícolas[3].

Por otra parte, la contaminación ocasionada por materia fecal de perros y gatos está estrechamente relacionada con las prácticas y hábitos de la población, como no recoger las heces de las mascotas durante los paseos o no realizar su desparasitación periódica, recomendada al menos dos veces al año. Estas acciones favorecen la dispersión de excremento en espacios públicos y contribuyen a otro tipo de contaminación del suelo: la contaminación parasitaria.

Diversos parásitos presentes en perros y gatos eliminan formas inmaduras a través de las heces, contaminando así el suelo. Para completar su ciclo biológico, los huevos deben ser ingeridos, convirtiendo al ser humano en un hospedador accidental que puede desarrollar diferentes enfermedades dependiendo del agente causal. Entre las principales afecciones se encuentran la larva migrans cutánea causada por *Ancylostoma spp*., la larva migrans visceral producida por *Toxocara canis y Toxascaris leonina*, así como infecciones intestinales asociadas con T*richuris vulpis.* Numerosos estudios sobre esta problemática se han enfocado en la contaminación de parques, plazas, banquetas, áreas recreativas y viviendas. Dentro de la población, los niños representan el grupo más vulnerable, debido a que suelen jugar directamente sobre el suelo y tienen mayor contacto con áreas potencialmente contaminadas[4].

PARTE EXPERIMENTAL

Para la selección de los sitios de muestreo se identificaron los parques con mayor afluencia de visitantes en los municipios de Guadalupe y Zacatecas, utilizando como referencia cartografía obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los espacios seleccionados fueron el Parque Ramón López Velarde (Parque de la Plata), el cual fue subdividido en seis áreas de estudio, así como el Parque La Encantada, el Parque Sierra de Álica (González Ortega), la Unidad Deportiva Guadalupe y la Unidad Deportiva Zacatecas Norte.

Los parques de mayor extensión fueron divididos en diferentes zonas para facilitar el muestreo. La obtención de muestras se realizó de manera aleatoria, recolectando aproximadamente 100 cm³ de suelo por punto de estudio. Asimismo, se tomaron muestras de pasto que fueron colocadas en bolsas de plástico tipo Ziploc. Posteriormente, en el laboratorio, dichas muestras fueron pesadas hasta obtener 100 g de material. Tanto las muestras de suelo como las de pasto fueron procesadas el mismo día de su recolección o, en su defecto, al día siguiente, manteniéndose bajo refrigeración durante un máximo de 24 horas.

Técnica de decantación y centrifugación para muestras de suelo

1. Se colocaron 900 mL de agua en una probeta con capacidad de 1,000 mL.
2. Posteriormente, se añadió suelo previamente desmenuzado hasta completar un volumen total de 1,000 cm³, equivalente aproximadamente a 100 cm³ de tierra.
3. La mezcla se agitó cuidadosamente con el fin de dispersar y mantener suspendidas las partículas del suelo en la columna de agua.
4. Se permitió la sedimentación de la muestra durante un periodo de 1 a 5 minutos, dependiendo de las características del suelo; los suelos limosos requirieron tiempos de decantación más prolongados. Durante este proceso, las partículas minerales de mayor tamaño, como grava, arena y limo grueso, se depositaron en el fondo de la probeta.
5. El sobrenadante obtenido se filtró a través de un sistema de tamices No. 50 y No. 325, o de mallas con mayor número de hilos por pulgada cuando se buscó recuperar huevos parasitarios.
6. Los pasos de agitación, decantación y filtración se repitieron al menos tres veces para optimizar la recuperación de partículas de interés.
7. El material retenido en el tamiz No. 325 se recuperó mediante lavado con agua a presión.
8. El residuo obtenido se transfirió a tubos para centrifugación.
9. Los tubos fueron equilibrados con agua cuando fue necesario para garantizar una centrifugación adecuada.
10. Se realizó una primera centrifugación a 1,000 g durante 5 minutos, eliminando posteriormente el sobrenadante.
11. El precipitado remanente se resuspendió utilizando una solución azucarada con densidad de 1.15, preparada con aproximadamente 454 g de azúcar disueltos en agua hasta completar un volumen de 1,000 cm³.
12. La suspensión se centrifugó nuevamente a 1,000 g durante 1 minuto.
13. Finalmente, el sobrenadante se filtró a través de un tamiz No. 325 o superior y se lavó con abundante agua para retirar el exceso de azúcar presente en la muestra.

14. Se lleva la placa de recuento y observar bajo microscopio estereoscópico provisto de sistema para observación diascopica.

Calculo de g= [0.00001118 X radio rotor (en centímetros tomado desde el centro del cabezal oscilante hasta el fondo del porta tubo) x rpm (revoluciones por minuto).

Técnica de pastos.
1. Se sustrajo 100g de pasto de la muestra obtenida en los parques se marcaron y etiquetaron, ya en el laboratorio y se envolvió en gasa para simular un costal y dejarla reposar 24 hrs. (horas) en copas de vidrio con 500ml agua tibia.
2. Pasadas las 24 hrs. Se retiró el pasto envuelto en gasa (costal) y se sustrajo la muestra de agua del fondo de la copa con una piseta para analizarla bajo el microscopio.
3. Si se desea se puede agregar sacarosa para hacer flotar los huevos presentes en las muestras.

RESULTADOS

Se analizaron un total de 50 muestras de suelo y pasto recolectadas en los diferentes parques evaluados. Los resultados mostraron que el 70.53% de las muestras presentaron algún tipo de estructura parasitaria, mientras que el 29.47% resultaron negativas.

Entre las muestras positivas se identificaron diversas formas parasitarias y otros elementos biológicos. Los hallazgos más frecuentes correspondieron a huevos de *Toxocara canis*, los cuales representaron el 26.78% del total de las muestras analizadas. Asimismo, se observaron pseudo-parásitos (11.60%), granos de polen (11.60%), larvas de *Toxocara canis* (4.46%), fibras vegetales o textiles (2.67%), quistes de *Giardia* spp. (1.78%) y huevos de *Trichuris vulpis* (1.78%). También se registró un 1.78% de formas parasitarias que no pudieron ser identificadas debido a limitaciones morfológicas.

Con menor frecuencia se detectaron huevos de *Dipylidium caninum* (0.89%), huevos de *Ancylostoma caninum* (0.89%), restos de pelo vegetal (0.89%), *Amidostomum anseris* (0.89%) y huevos de *Toxocara cati* (0.89%). Adicionalmente, se observaron larvas viables en algunas de las muestras procesadas, lo que sugiere condiciones ambientales favorables para la supervivencia y posible transmisión de estos organismos.

El parque Ramón López Velarde fue el sitio con mayor número de muestras recolectadas, obteniéndose un total de 32 muestras entre suelo y pasto. De estas, 20 resultaron positivas a la presencia de formas parasitarias, lo que representa una frecuencia de positividad cercana al 67%. Este hallazgo evidencia una importante contaminación ambiental por estadios parasitarios en esta área recreativa.

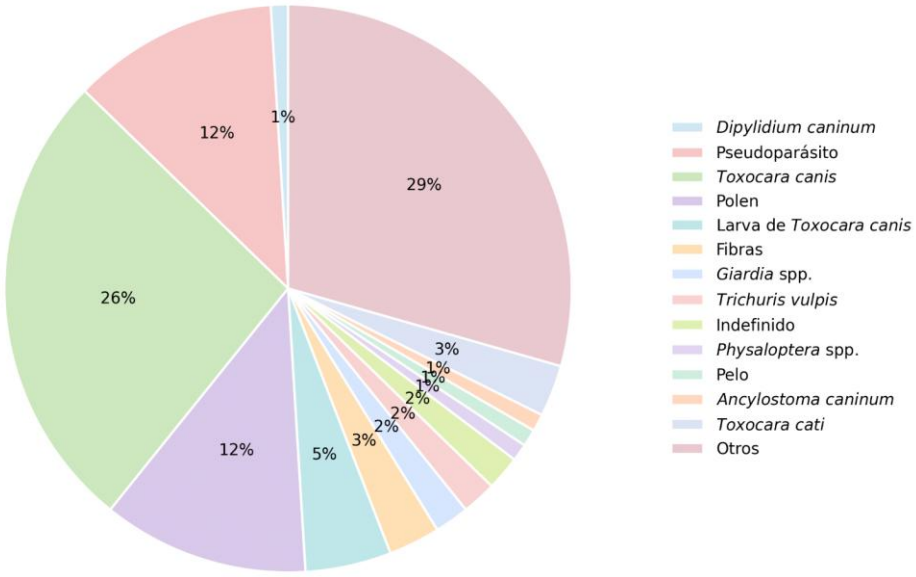


Fig 1. Porcentaje de parásitos encontrados, en relación al número de muestras.

El análisis comparativo entre los tipos de muestras reveló que el suelo presentó una mayor cantidad y diversidad de formas parasitarias en comparación con las muestras de pasto. Entre los organismos identificados, los huevos y larvas de *Toxocara canis* fueron los más abundantes, confirmando su predominio en el ambiente y resaltando su relevancia como agente zoonótico de importancia para la salud pública.

La elevada presencia de huevos de *Toxocara canis* encontrada en este estudio coincide con reportes realizados en otras regiones de México y del mundo, donde se ha documentado la contaminación de parques públicos por heces de perros y gatos. La persistencia de estos huevos en el ambiente constituye un riesgo potencial para la población, especialmente para niños, quienes tienen mayor contacto directo con el suelo durante actividades recreativas. La exposición a estos estadios infectantes puede favorecer la aparición de toxocariasis humana, enfermedad considerada una zoonosis de distribución mundial.

Para evaluar la relación entre las variables estudiadas se realizó un análisis estadístico utilizando el software Statgraphics centurion. Se consideraron como factores de estudio el método empleado, los factores ambientales, el tipo de muestra y las formas parasitarias encontradas, mientras que la zona de muestreo fue incluida como covariable. El análisis se efectuó sobre 50 casos completos.

Los resultados indicaron que la covariable zona y el factor parásito ejercieron un efecto estadísticamente significativo sobre los resultados obtenidos mediante los métodos de análisis utilizados. Asimismo, se observó que tanto la zona de muestreo como el método empleado influyeron significativamente en la detección de formas parasitarias, lo que sugiere que la distribución espacial de los parásitos y las características metodológicas son factores importantes para la identificación de contaminación parasitaria ambiental.

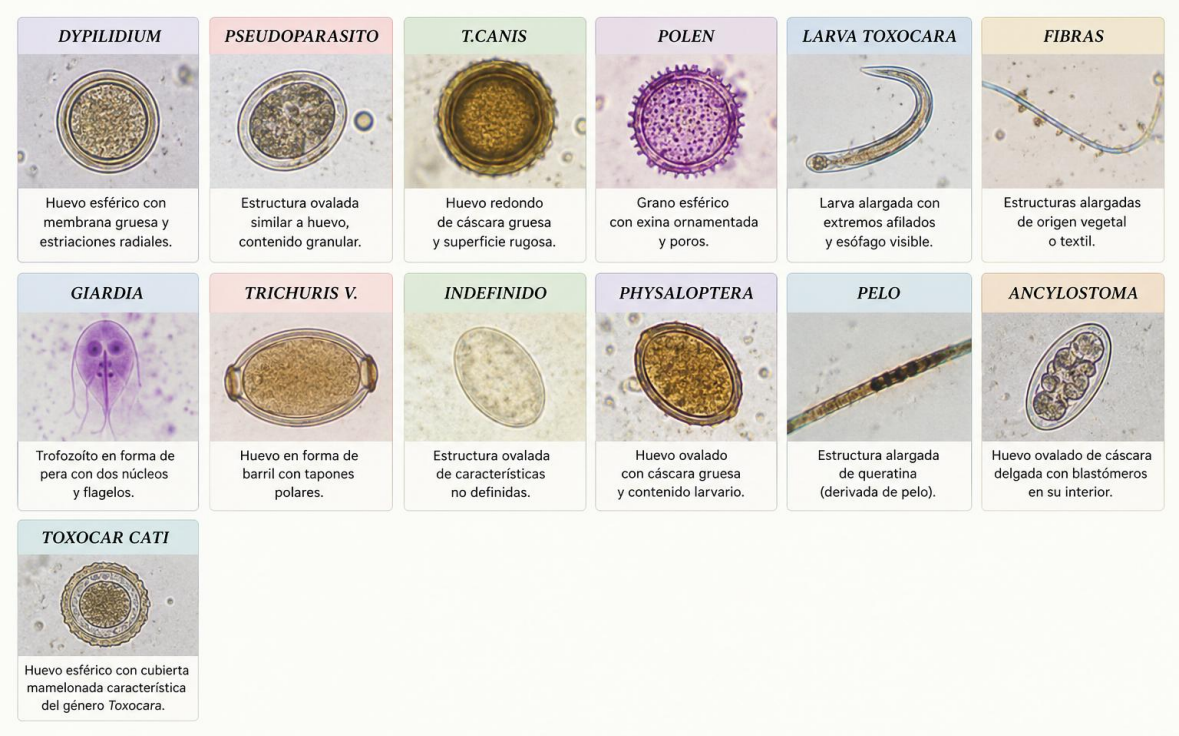


Fig 2. Imágenes microscópicas representativas de las formas parasitarias identificadas en las muestras analizadas. La resolución de las imágenes fue mejorada mediante técnicas de inteligencia artificial utilizando ChatGPT para optimizar la calidad visual y facilitar la observación de las estructuras morfológicas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que existe contaminación parasitaria en las muestras de suelo y pasto recolectadas en los parques públicos evaluados. Entre las formas parasitarias identificadas, *Toxocara canis* fue la especie detectada con mayor frecuencia, lo que representa un hallazgo relevante debido a su reconocido potencial zoonótico y al riesgo que implica para la salud pública.

Durante el trabajo de campo se observó que las áreas de muestreo presentan características heterogéneas en cuanto a su conservación y mantenimiento. En algunas zonas se evidenció un notable deterioro de la infraestructura y de las áreas verdes, así como una escasa atención por parte del personal encargado de su cuidado.

Particularmente, en el Parque Arroyo de la Plata, en el sector correspondiente al municipio de Zacatecas y específicamente a partir de la colonia Tres Cruces, se observó una menor presencia de personal de mantenimiento. En esta área predominan espacios con escasa cobertura vegetal y pasto en condiciones deficientes, además de áreas recreativas que muestran signos evidentes de desgaste. Asimismo, se registró una menor afluencia de visitantes y animales de compañía en comparación con la zona perteneciente al municipio de Guadalupe. No obstante, a pesar de estas condiciones, las muestras de suelo y pasto recolectadas en este sector presentaron la presencia de diversas formas parasitarias.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fuentes Cintra, Maritza; Pérez García, Liumar; Suárez Hernández, Yolanda; Soca Pérez, Maylín; Martínez Martínez, Arlene. 2006. La zoonosis como Ciencia y su Impacto Social. REDVET Revista electrónica de Veterinaria, Vol. VII, Núm. 9, septiembre, pp. 1-19. Veterinaria Organización. España ISSN 1695-7504. http://www.veterinaria.org/revistas/redvet. Vol. VII, No 09.
2. Silva Arroyare S y Correa Restrepo F; 2009. Análisis de la Contaminación del Suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Semestre económico vol. 12 no.- 23 pp13-34, isnn 01206346 Medellín Colombia.
3. http//www.scielo.org.co/pdf/seec/vl2n23/v12n23a2pdf
4. Enkerlin, 1997. Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible. http://contaminacion-ambiente.blogspot.mx/, Consultado 18/04/2013
5. Icarito; 2012. Parásitos en mascotas, http://www.icarito.cl/actualidad/articulo/padres/2012/03/361-9414-9-parasitos-de- mascotas-pueden-provocar-serias-enfermedades-a-ninos.shtml, Consultado 18/04/2013
6. Shurtleff y Averre; 2000. Técnica para obtención de parásitos. http://www.veterinaria.org/revistas/redvet, Consultado 08/04/2013
7. JunqueraP.2012ANCYLOSTOMAspp,gusanosnematodosintestinalesdePERROS Y GATOS: biología, prevención y control. Ancylostomacaninum, Ancylostoma brasiliense, Ancylostomatubaeforme (En línea) 2012, http://parasitosdelganado.net/index.php?option=com_content&view=article&id=1463 &Itemid=1594.
8. Lijeron, S.G.E, Sánchez, T.N. 1998-2005 “Análisis retrospectivo de parasitosis por helmintos gastrointestinales de canes atendidos en el Hospital Universitario de Veterinaria, periodo 1998-2005” Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UAGRM.
9. Martínez F.A.R., Fuentes C. I.*, Rodríguez F. M., Fernández C.J.D.*, 1998. Toxoplasmosis, Departamento de Parasitología. Facultad de Farmacia. Universidad Complutense. *Centro Nacional de Microbiología. Instituto de Salud Carlos III, Majadahonda. Madrid. Medicine; 7(81): 3760-3766
10. Maracaibo;2009.Revista. Científica. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S079822592009000300006&script=sci_artte xt. Consultado 11/03/2013
11. Maracaibo; 2007. Contaminación de suelos con huevos de Toxocara spp. (Nematodo, ascáridida) en parques públicos de la ciudad de coro, estado falcón, Venezuela. Revista. Científica. Maracaibo. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-22592007000200003&script=sci_arttext. Consultado 20/03/2013
12. Merck Sharp & Dohme 2005. Manual Merck, infecciones parasitarias. Capítulo 184. http://www.msd.es/publicaciones/mmerck_hogar/seccion_17/seccion_17_184.html. Consultado 12/03/2013
13. Milano A.M.F. y Oscherov E.B. 2002. Contaminación por parásitos caninos de importancia zoonóticas en playas de la ciudad de corrientes, Argentina.
14. Parasitol. latinoam. vol.57 no.3-4 Santiago Jul. 2002. Pág. Internet disponible. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-77122002000300006&lng=en&nrm=iso&ignore=.html. Consultado 31/01/2013
15. Neira O, Jofré M y Muñoz S. 2008 Infección por Dipilydiumcaninum en un preescolar. Presentación del caso y revisión de la literatura Universidad de Valparaíso, Chile pp.465-470.
16. Nicoletti A, Vito S, Mantella A, Vitale G, Contrafatto D, Sorbello V, Biondi R, Pierre- Marie P, Garcia H, Zappia M, Bartoloni A;2008. Epilepsy and toxocariasis: a case- control study in Italy. Consultado 09/05/2013
17. Nkouawa A.; 2011.Serological and molecular tools to detect neurologic parasitic zoonoses in rural Cameroon.

DETERMINACIÓN DE VALORES DE REFERENCIA PARA PROTEINAS TOTALES, LEUCOCITOS Y MICROHEMATOCRITO DE *Phoenicopterus Ruber* BAJO CUIDADO PROFESIONAL

Rufino Osorio Márquez[1,2], Maricela Duran Ríos[2], Jesús Iván Mejía Navarro[2], Víctor Jesús Sagrero Mora[2], Gabino Corona Patricio[2].

[1] Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, [2]Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
rufino.osorio@umich.mx

RESUMEN

El flamenco americano es una especie de ave que vive en áreas tropicales de América y que está presente en diversas colecciones faunísticas tanto públicas como privadas debido a su particular belleza, de tal manera que resulta necesaria la implementación de cuidados profesionales para garantizar el óptimo estado de salud. En el diagnóstico clínico habitual es necesaria la evaluación de los diversos líquidos corporales, entre ellos la sangre. Los valores de referencia sanguíneos (valores porcentuales de leucocitos, proteínas totales y microhematocrito) en animales bajo cuidado profesional son de vital importancia para su manejo integral, ya que permiten evaluar la salud en general de los individuos dentro de los programas de bienestar animal y de medicina preventiva. En este estudio se recolectó muestra sanguínea de la vena basílica a n=20 ejemplares clínicamente sanos de flamenco americano (Phoenicopterus ruber) del Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, en tubos microtainer con EDTA y tubos microtainer sin anticoagulante, a los cuales se les realizó la medición del microhematocrito, proteínas totales por refractometría y conteos diferenciales de leucocitos previa tinción con colorante de Wright. Se realizaron pruebas estadísticas para determinación del tamaño de muestra para una población finita al 95% de confiabilidad, se determinó la media, desviación estándar, error estándar de la media y los intervalos de referencia mediante el programa de Excel, paquetería Microsoft office profesional plus 2016. Los resultados obtenidos para esta especie en los intervalos de referencia al 95% de confiabilidad fueron los siguientes: Linfocitos de 54.65%-46.74 %, heterofilos de 43.50%-32.89%, eosinófilos de 3.6-1.18%, monocitos de 3.78-1.31%, basófilos 7.84%-4.45%. El microhematocrito tuvo una media de 49.38 % un intervalo de referencia de 54.05% a 57.37 % las proteínas totales de 6.3 g/dl-5.6 g/dl. Este estudio es el primero que se realiza en esta especie bajo cuidado profesional en México y brinda información objetiva para el correcto diagnóstico clínico de patologías o procesos de salud-enfermedad, ya que abarca los valores de referencia de las células de defensa (leucocitos), indicios sobre inflamaciones como las proteínas totales, así como los valores de la serie roja en este caso el microhematocrito.

INTRODUCCIÓN

La medicina de la fauna silvestre, particularmente aquella enfocada en animales bajo cuidado profesional, depende críticamente de análisis clínicos que provean datos objetivos sobre el estado fisiológico de los pacientes. Si bien los exámenes físicos constituyen el primer filtro en los protocolos comunes de evaluación, el acceso a información confiable y medible exige el análisis de fluidos corporales, siendo la sangre el recurso por excelencia. El estudio del tejido hemático abre una ventana hacia el interior del organismo, permitiendo detectar infecciones bacterianas, parasitarias, fúngicas o virales, así como procesos inflamatorios, enfermedades crónicas, trastornos genéticos, deficiencias nutricionales y neoplasias. Asimismo, funciona como un indicador del rendimiento de diversos órganos y sistemas.

Para descifrar estos componentes, la hematología se apoya en dos vertientes principales: la bioquímica sérica (orientada al estudio de analitos específicos en el plasma) y la biometría hemática o hemograma, término acuñado en la medicina veterinaria para el examen cuantitativo y cualitativo de las células sanguíneas (forma, tamaño, coloración y densidad). En el ámbito de la fauna silvestre,

la literatura científica aún padece de un vacío informativo respecto a los valores de referencia de los analitos y la descripción formal de los elementos formes. Bajo este escenario, la caracterización morfológica y el conteo porcentual de las células sanguíneas en aves emergen como herramientas indispensables para el diagnóstico clínico de múltiples patologías (Gálvez et al., 2009).

No obstante, el análisis hematológico en aves reviste una alta complejidad debido a las marcadas divergencias evolutivas con los mamíferos. Las aves poseen eritrocitos nucleados de mayor tamaño, una particularidad que obstaculiza su procesamiento en los analizadores convencionales de biometría hemática; estos últimos no logran realizar la lisis adecuada de los hematíes ni medir parámetros críticos como la hemoglobina sin tecnología especializada (Briggs, 2009). A esta limitante se suman las variaciones morfológicas de los leucocitos entre aves, mamíferos, reptiles, anfibios y peces. Esta diversidad biológica explica la escasez de equipos automatizados en el mercado y obliga a los especialistas a resolver el hemograma mediante métodos manuales. Destacan técnicas tradicionales como el conteo celular en cámara de Neubauer (hemocitómetro), el uso de pipetas hematológicas y el empleo de soluciones diluyentes específicas (como las de Natt y Herrick) para la cuantificación de eritrocitos, leucocitos y trombocitos. Complementariamente, la identificación y el diferencial leucocitario en laminilla exigen el uso de tinciones específicas como Wright o Hemocrom. Como efectores de la respuesta inmune, los leucocitos defienden al organismo frente a agentes potencialmente patógenos. En las aves se han descrito cinco linajes principales: linfocitos, heterófilos, eosinófilos, basófilos y monocitos. Las fluctuaciones numéricas de estas poblaciones, junto con sus modificaciones estructurales y de afinidad tintorial, guían la interpretación diagnóstica del médico, haciendo imperativa la delimitación previa de los parámetros normales en poblaciones sanas (Avilés et al., 2015). Con este propósito, el presente trabajo determinó los intervalos de referencia con un 95% de confiabilidad (Thorensen, 2009; Olascoaga et al., 2021) para leucocitos, proteínas totales y microhematocrito. El estudio se condujo en una población de n = 20 ejemplares clínicamente sanos de flamenco americano (*Phoenicopterus ruber*, Linnaeus, 1758) albergados bajo cuidado profesional en el Parque Zoológico Benito Juárez en Morelia, Michoacán, México.

TEORÍA

En la práctica clínica aviar, establecer los valores hematológicos de referencia en individuos clínicamente sanos constituye un pilar fundamental para la evaluación médica (Soto, 2009). Esta estandarización es compleja, ya que el perfil sanguíneo es altamente dinámico y responde a variables ambientales como la altitud y la temperatura, así como a factores intrínsecos del paciente, entre los que destacan la edad, el sexo, el estado nutricional y la presencia de patologías subyacentes (Gonzales, 2020). A pesar de la delicadeza anatómica de estos pacientes, los procedimientos de muestreo son seguros si se respetan los límites biológicos: en aves sanas, es viable extraer un volumen de sangre equivalente hasta el 1% de su peso corporal sin comprometer en absoluto su estado de salud (Walberg, 2001).

El perfil analítico de rutina abarca la bioquímica sanguínea y la biometría hemática. Mientras que el análisis bioquímico se ha automatizado mediante una amplia gama de equipos y metodologías modernas, el hemograma aviar aún depende significativamente de procesos manuales. En los últimos años, el mercado ha visto nacer analizadores capaces de procesar muestras con eritrocitos nucleados —como el Cell Dyn 3500—, aunque su adopción se ve limitada por los altos costos de adquisición (Walberg, 2001).

Bajo este panorama, la evaluación microscópica del frotis sanguíneo se consolida como una técnica diagnóstica insustituible tanto en la medicina humana como en la veterinaria. El examen visual de la muestra permite identificar la presencia de hemoparásitos, inclusiones citoplasmáticas (Tkach, 2012), alteraciones morfológicas celulares (Ventimiglia, 2017) y la aparición de granulaciones secundarias o tóxicas. Asimismo, es la herramienta clave para detectar fluctuaciones cuantitativas en los elementos formes de la sangre (Alvarado, 2009). Más allá de su alta sensibilidad diagnóstica, el frotis destaca por ser una técnica rápida y de bajo costo que, en manos de personal capacitado y

con experiencia citológica, garantiza un diagnóstico morfocitómetrico confiable, elemento crucial para diseñar tratamientos precisos ante cualquier escenario patológico (Simón, 2019).

El mapa celular de la sangre periférica en aves comprende eritrocitos, trombocitos y una población leucocitaria integrada por heterófilos, linfocitos, monocitos, eosinófilos y basófilos (Alvarado, 2009). Estas líneas celulares exhiben variaciones morfológicas y numéricas significativas que dependen directamente de la especie aviar bajo estudio (Clark et al., 2009).

Para lograr una resolución óptica óptima que permita discriminar estas sutiles diferencias estructurales, es imperativo realizar una correcta extensión de la muestra sobre el portaobjetos. Posterior a la confección del frotis, se procede a su fijación y coloración mediante tinciones de tipo Romanowski; entre estas, el colorante Wright, el Giemsa y el Hemocrom siguen siendo los estándares de oro en el laboratorio hematológico (Gastélum, 2021; Vargas, 2023).

En el torrente sanguíneo aviar, el eritrocito domina los elementos formes y abandona la regla de la anucleación propia de los mamíferos. Estas células maduras, responsables de transportar la hemoglobina, son estructuras ovoides provistas de un núcleo central del mismo contorno y un citoplasma eosinófilo de coloración homogénea. No obstante, la geometría "ovoide" es maleable entre especies: mientras algunas exhiben contornos marcadamente redondeados, otras optan por configuraciones estrechas y alargadas. Al microscopio, su núcleo destaca por una cromatina basófila oscura y de aspecto grumoso, superando en dimensiones a sus homólogos mamíferos.

El análisis citológico de un frotis permite cartografiar el desarrollo de esta estirpe. Es viable identificar eritrocitos policromatófilos —precursores inmaduros cuyo citoplasma azulado delata una alta concentración de ARN ribosómico—, los cuales constituyen hasta el 5% del total celular en individuos sanos. En fases previas de maduración aparecen los rubricitos, caracterizados por una elevada relación núcleo-citoplasma y un sutil pero denso borde citoplasmático basófilo. De manera excepcional, la muestra puede revelar una ínfima proporción de eritrocitos anucleados, inferior al 1% (Clark, 2009).

El estudio cuantitativo y cualitativo de este grupo define la denominada "línea roja" de la biometría hemática, enfocada en evaluar el volumen, tamaño, morfología, tinción y carga de hemoglobina. Para cuantificar la proporción celular en el volumen sanguíneo total se recurre al hematocrito; en este trabajo, dicha métrica se determinó mediante la técnica del microhematocrito por tubo capilar, un método idóneo por su mínimo requerimiento de volumen de muestra.

La inmunidad celular descansa en los leucocitos (línea blanca), donde el heterófilo se erige como el componente más abundante en el entorno aviar (Gálvez et al., 2011). Estas células esféricas poseen un núcleo lobulado teñido de morado por su densa cromatina, y un citoplasma pálido poblado por gránulos espiculados de color rojo ladrillo (Morales, 2016). Bajo tinciones tipo Romanowski, estos prominentes gránulos acidófilos revelan una geometría fusiforme en cortes longitudinales y redondeada en secciones transversales, oscilando cromáticamente entre el rojo y el marrón. Su densidad es tal que suelen distribuirse uniformemente hasta eclipsar la estructura nuclear y el discreto citoplasma basófilo subyacente (Clark, 2009).

Por su parte, el linfocito aviar comparte un espejo morfológico con el de los mamíferos, clasificándose en variantes pequeñas, medianas y grandes. Aquí, la pericia del hematólogo es crucial: la similitud dimensional de los linfocitos pequeños propicia que se confundan frecuentemente con trombocitos (Morales, 2016). Esta estirpe presenta un núcleo redondo u ovoide de cromatina grumosa irregular y un citoplasma agranulocítico moderadamente basófilo, que a veces alberga finos puntos azurófilos o basófilos. Por lo general, el núcleo fagocita visualmente el espacio celular, relegando al citoplasma a una mínima franja periférica (Clark, 2009). Clínicamente, las fluctuaciones en su conteo guían al diagnóstico, forzando la evaluación o descarte de cuadros de estrés, procesos inflamatorios, virosis o leucemia linfocítica.

Los monocitos representan los gigantes del frotis aviar y mamífero. Estos leucocitos agranulocitos portan un núcleo irregular y compacto, acompañado de un citoplasma sutilmente basófilo y densamente vacuolado. Su presencia habitual en frotis sanos es marginal (0-3%), por lo que su ausencia carece de implicación patológica; sin embargo, una monocitosis activa enciende las alarmas hacia patologías crónicas, clamidiasis, micobacteriosis o aspergilosis (Phillip, 2009; Gálvez et al., 2011; Albarracín, 2015).

El diagnóstico de los eosinófilos plantea un reto técnico debido a su parecido con los heterófilos, un error común en laboratorios inexpertos (Clark, 2009). Son células redondeadas con núcleo bilobulado y un citoplasma azul claro colmado de gránulos esféricos que brillan con mayor intensidad que los del heterófilo, aunque su arquitectura exacta varía según la especie estudiada (Mitchell y Jones, 2008). En la clínica aviar, su elevación responde a parasitosis por *Giardia sp.*, ascáridos y céstodos; una diferencia clave con los mamíferos es que en las aves no se documentan eosinofilias vinculadas a hipersensibilidad o trastornos autoinmunes, siendo su ausencia en sangre periférica un rasgo de normalidad (Gálvez et al., 2011).

Los basófilos, ligeramente más compactos que heterófilos y eosinófilos, exhiben una marcada afinidad tintorial tanto en su núcleo como en sus gránulos citoplasmáticos intensamente basófilos. Un incremento en su población periférica actúa como un biomarcador de inflamación crónica e infecciones en el sistema respiratorio (Gálvez et al., 2009).

Finalmente, la integridad vascular y la hemostasia dependen de los trombocitos. Estas unidades, notablemente más pequeñas que los eritrocitos y leucocitos, conservan su núcleo. Se estructuran a partir de una morfología nuclear ovoide arropada por un citoplasma moderado, cuyo espectro cromático transita entre la hialinidad, el gris pálido y un azul tenue, mostrando con frecuencia proyecciones citoplasmáticas o pseudópodos en su superficie (Clark, 2009).

PARTE EXPERIMENTAL

La fase experimental se desarrolló durante octubre de 2025 en las instalaciones del Parque Zoológico “Benito Juárez”, ubicado en la Calzada Juárez S/N, Colonia Félix Ireta (C.P. 58070), en Morelia, Michoacán, México. El universo de muestreo estuvo constituido por 20 ejemplares de flamenco americano (*Phoenicopterus ruber*) mantenidos bajo cuidado profesional.

La captura y contención física de las aves fue ejecutada exclusivamente por personal calificado adscrito a la Unidad Operativa de Atención a Aves. De forma inmediata a la sujeción, el equipo de médicos veterinarios procedió con una evaluación clínica integral; este filtro permitió incluir de manera estricta únicamente a aquellos ejemplares considerados clínicamente sanos, descartando de forma automática a los individuos que manifestaran signos evidentes de enfermedad o cuadros agudos de estrés.

Para la obtención del tejido hemático se realizó una punción en la vena basílica utilizando jeringas esterilizadas de 1 mL con aguja desmontable. El volumen recolectado se distribuyó de inmediato en dos variantes de tubos Microtainer de 500 microlitros:

- Alícuotas con EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) como anticoagulante.
- Alícuotas sin anticoagulante destinadas a la obtención de suero/plasma.

Una vez lograda la homogeneización de las muestras con EDTA, se confeccionaron los frotis sanguíneos sobre portaobjetos para su posterior tinción mediante la técnica de Wright. Con el propósito de determinar el microhematocrito a partir de este mismo microtubo, se colectó sangre por capilaridad empleando tubos capilares con EDTA. Los capilares se sellaron de forma hermética mediante exposición al calor y se sometieron a un proceso de centrifugación a 3500 revoluciones por minuto (rpm) durante 10 minutos (Soto, 2009).

La evaluación citológica y el recuento diferencial de la serie blanca se llevaron a cabo en el laboratorio mediante el uso de un microscopio clínico Velab-B7 acoplado a un piano contador de células de uso hematológico.

La determinación analítica de las proteínas totales se efectuó a partir de las muestras depositadas en los tubos Microtainer carentes de anticoagulante. Los tubos fueron centrifugados bajo las mismas condiciones operativas de 3500 rpm por un periodo de 10 minutos. Concluida la separación de las fases, se dispuso una gota del plasma sobrenadante sobre el prisma de un refractómetro clínico portátil para realizar la lectura directa de la concentración proteica.



Figura 1. Ejemplares de Phoenicopterus ruber bajo cuidado profesional.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Conteo diferencial de Leucocitos.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Mediante el programa de Excel, paquetería office 2016, Se determinó el tamaño de la muestra para una población finita de 21 individuos, en el cual el valor fue n=20 individuos, posteriormente se determinaron la media, desviación estándar, error estándar de la media, el valor más bajo, el valor más alto y los intervalos de confianza para la media al 95%, (Castilla, 2011; Olascoaga, et al 2021), obteniéndose los siguientes resultados.

ANALITO	MICROHEMATOCRITO	LINFOCITOS	HETEROFILOS	EOSINOFILOS	MONOCITOS	BASOFILOS	PROTEÍNAS TOTALES
MEDIA	49.388	50.7	38.2	2.4	2.55	6.15	5.988888889
DESV. ESTND.	4.069230627	9.015191857	12.107414	2.779625117	2.81864096	3.8563004	0.716107853
ERROR ESTAND. MEDIA	0.90990763	2.015858182	2.70730007	0.621543071	0.63026728	0.862295	0.160126584
RANGO	18.12	34	37	10	10	15	2.8
INTERV. DE CONF.	1.783386184	3.951009435	5.30621064	1.218202035	1.23530117	1.6900671	0.313842337
VALOR MAS BAJO	38.33	32	17	0	0	2	4.4
VALOR MÁS ALTO	56.45	66	54	10	10	17	7.2
TAMAÑO DE MUESTRA	20	20	20	20	20	20	20
INTERV. REF. SUP.	51.17141895	54.65108204	43.5063081	3.61822442	3.78532387	7.8400982	6.302736993
INTERV. REF. INF.	47.60458105	46.74891796	32.8936919	1.18177558	1.31467613	4.4599018	5.675040784

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico de proteínas totales, microhematocrito y leucocitos en Phoenicopterus ruber bajo cuidado profesional. Fuente: Elaboración propia.

Este es el primer estudio llevado a cabo en México con respecto a esta especie, ya que existen algunos trabajos como los realizados por Norton (2002) en USA, de la asociación de Zoológicos de América(AZA), por C.M. Hawkey, et al. (2008) en la Zoological society of London realizado en la especie de Phoenicopterus roseus, con los cuales se encontraron bastantes similitudes como la cuestión de que los heterofilos sean los leucocitos más numerosos, seguidos de los linfocitos, así como la baja cantidad de monocitos, basófilos y eosinófilos. Cabe señalar que para términos prácticos y de acuerdo a autores como Gálvez (2009), Clark (2009) y Phillips (2011) los Monocitos, eosinófilos y basófilos pueden tener valores de cero por ciento de manera normal por lo que en este

estudio los valores de referencia serian para monocitos de 0-3%, eosinófilos de 0-3% y basófilos de 0-7%.

CONCLUSIONES

La determinación de los valores de referencia de los analitos sanguíneos para Phoenicopterus ruber que se realizaron en este trabajo brindan objetividad para establecer diagnósticos médicos más precisos en los ejemplares bajo cuidado profesional que se encuentran en el Parque Zoológico Benito Juárez, así mismo brinda una base para futuros estudios en colecciones faunísticas publicas y privadas con esta especie.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, M. C., Arraga-Alvarado, C., Rincón Rincón, M., Fernández, G., Aguilar Lara, J., Villasmil-Ontiveros, Y., Gómez, O., Henriquez, A., "Valores hematológicos de psitácidos de los géneros Ara y Amazona cautivos en zoológicos de Venezuela," *Rev. Cient. FCV-LUZ*, Vol. 18, No. 6, 2008, pp. 649–661.
2. Avilez Colón, B. L., Rugeles Pinto, C. C., Jabib Ruiz, L., & Herrera Benavides, Y. M., "Parámetros hematológicos en pollos de engorde criados en una granja de producción cerrada en el trópico bajo," *Rev. Med. Vet.*, Vol. 29, 2015, pp. 33–39.
3. Briggs, C., "Quality counts: new parameters in blood cell counting," *Int. J. Lab. Hematol.*, Vol. 31, No. 3, 2009, pp. 277–297.
4. Christine Hawkey, MG Hart, HJ Samour, JA Knight y RE Hutton (1984) Hallazgos hematológicos en flamencos rosados cautivos sanos y enfermos (Phoenicopterus ruber ruber) , Patología aviar, 13: 2, 163-172, DOI: 10.1080 / 03079458408418521
5. Castilla Serna, L., *Manual práctico de estadística para las ciencias de la salud*, 1.ª ed., México: Trillas, 2011, 168 pp.
6. Clark, P., Boardman, W., & Raidal, S., *Atlas of Clinical Avian Hematology*, Wiley-Blackwell, Oxford, 2009, 184 pp., ISBN 978-1-4051-9248-4.
7. Claver, J. A., "El trombocito aviar," *InVet*, Vol. 7, No. 1, 2005, pp. 139–146
8. Gálvez Martínez, C. F., Ramírez Benavides, G. F., & Osorio, J. H., "El laboratorio clínico en hematología de aves exóticas," *Biosalud*, Vol. 8, No. 1, 2009, pp. 178–188.
9. Gastélum Máynez, M. G., *Manual de prácticas de inmunología veterinaria*, Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, 2021.
10. Hawkey, C. M., Dennett, T. B., *Atlas de Hematología Veterinaria Comparada: Células Sanguíneas Normales y Anormales en Mamíferos, Aves y Reptiles*, 1.ª ed., Madrid: Grass, 1989, p. 250.
11. Herrera, J. A., Avalos, A., Herrera, G., Gómez, D., Varela, A., Guzmán, A., & Rosales, A. M., "Parámetros hematológicos en polluelos de psitácidos en cautiverio de origen silvestre," *Rev. Med. Vet. Zoot.*, Vol. 60, No. 2, 2013, pp. 79–85.
12. Norton (2002). Zoo and Wild Animal Medicine. Quinta Edición.
13. Olascoaga-Elizarraraz, A., Servín Zamora, E., Nogueira Marmolejo, M. G., Ojeda Chávez, J., Alcaraz Sosa, L. E., Díaz Negrete, M. T., López Montaño, M., Ducoing Watty, A., Majluf Trejo, A. D., Maldonado-Reséndiz, R. I., "Estimación de parámetros hematológicos en ajolote de Xochimilco (Ambystoma mexicanum) bajo cuidado humano en el Zoológico de Chapultepec, México," *Rev. Latinoam. Herpetol.*, Vol. 4, No. 1, 2021, pp. 95–104. https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2021.1.198
14. Ruiz, G., Torrez, C., "Valores hematológicos, química sérica y descripción de células sanguíneas del cóndor andino (Vultur gryphus) cautivos en el Zoológico Vesty Pakos, de La Paz, Bolivia," *Rev. Cs. Farm. Bioqu.*, Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 35–48.
15. Simón Pita, A. M., "Importancia de la morfología en el diagnóstico hematológico," *Rev. Cubana Hematol. Inmunol. Hemoter.*, Vol. 35, No. 3, 2019.
16. Soto Piñeiro, C. J., Acosta Guevara, I., Cruz López, E., "Parámetros hematológicos de Cotorras (Amazona leucocephala) y Cateyes (Aratinga euops)," *REDVET. Rev. Electrón. Vet.*, Vol. 10, No. 7B, 2009, pp. 1–10.

17. Thorensen, S. I., Arnemo, J. M., y Liberg, O., “Hematology and serum clinical chemistry reference intervals for free-ranging Scandinavian gray wolves (Canis lupus),” *Vet. Clin. Pathol.*, Vol. 38, No. 2, 2009, pp. 224–229.
18. Tkach, A. D., Moreno, J. D., & Bava, A. J., “Diagnóstico presuntivo de histoplasmosis en un frotis sanguíneo,” *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana.*, Vol. 46, No. 4, 2012, pp. 677–682.
19. Vargas, W. M., & Vargas, A. M., “Imagen: Frotis de sangre periférica,” *Rev. Fac. Med. Univ. Iberoam.*, Vol. 1, No. 1, 2023, pp. 5–velab.com/es/blogs/news/las-celulas-sanguineas-una-mirada-a-la-aplicacion-del-conteo-celular.
20. Ventimiglia, F. D., Rivas-Ibargüen, M. A., Vildoza, A., y Orsilles, M. Á., “Valor diagnóstico de la morfología eritrocitaria en las anemias,” *Acta Bioquím. Clínica. Latinoamericana.*, Vol. 51, No. 3, 2017, pp. 379–386.
21. Walberg, J., “White blood cell counting techniques in birds,” *Semin. Avian Exot. Pet Med.*, Vol. 10, No. 2, 2001, pp. 72–76.

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ALTERNATIVOS PARA EL CULTIVO DE ARÁNDANO *(Vaccinum Corymbosum L.)*

Joel De Jesús Barba Franco[1 y 2], Perla Anahi Betancourt-Alvizo1; Cristina Jocelyn Gutierrez-Hernandez1, Nancy Santiago-Hernández[2] y Cesar Salvador Magaña Martinez[2*]

[1]Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Lagos, [2] Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas.
*cesar.magana@arandas.tecmm.edu.mx

RESUMEN

El cultivo de arándano en México ha cobrado gran relevancia, posicionándose Jalisco como el segundo estado productor. Sin embargo, los sistemas intensivos dependen cada vez más de sustratos como la fibra de coco, cuyos costos elevados y huella ambiental limitan su sostenibilidad. Paralelamente, la industria tequilera genera grandes volúmenes de bagazo de agave, un residuo que provoca contaminación por acumulación a cielo abierto. Ante esta problemática, la investigación propone evaluar el bagazo como sustrato alternativo, ya sea solo o en mezcla con fibra de coco, buscando reducir costos, aprovechar un residuo local y mantener la productividad del cultivo bajo principios de economía circular.

Se estableció un experimento completamente al azar con tres tratamientos: fibra de coco (FC), bagazo de agave (BA) y una mezcla 50:50 (FC+BA), con cinco réplicas por tratamiento. Se utilizaron plantas de arándano de 3 a 4 años en macetas de 20 L bajo macrotúnel, con riego por goteo y fertilización homogénea. Se caracterizó cada sustrato en pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, cenizas, densidad real y aparente, porosidad y capacidad de campo. Las variables agronómicas evaluadas incluyeron altura de planta, número de ramas, flores y frutos por planta, clorofila (unidades SPAD) y área foliar.

La fibra de coco presentó el mayor contenido de materia orgánica (91.13 %) y capacidad de campo (78 %), seguida por la mezcla (88.74 % y 70 %) y el bagazo solo (84 % y 69 %). En clorofila, FC alcanzó 52.74 SPAD, la mezcla 49.86 SPAD y BA 47.74 SPAD, sin diferencias estadísticas. La altura de planta fue similar entre tratamientos (~64-69 cm). En el número de frutos por planta, la mezcla FC+BA superó significativamente a los demás con 63 frutos, frente a 48 de FC y solo 24 de BA. La evolución de floración mostró que la mezcla alcanzó un pico de ~18 flores por planta, muy por encima del bagazo solo (8 flores). Estos resultados indican que, aunque la fibra de coco sola favorece mejores propiedades fisicoquímicas, la combinación con bagazo potenció el rendimiento productivo.

A pesar de que el sustrato de fibra de coco mostró las mejores características fisicoquímicas y mayor contenido de clorofila, fue la mezcla 50:50 de bagazo con fibra de coco la que logró el mayor número de frutos por planta, superando incluso al sustrato comercial. Esto sugiere un efecto sinérgico entre ambos materiales, donde el bagazo aporta propiedades complementarias. Se concluye que el bagazo de agave, utilizado en mezcla con otros sustratos, representa una alternativa viable, económica y sustentable para el cultivo de arándano, contribuyendo a reducir residuos agroindustriales y la dependencia de materiales importados.

INTRODUCCIÓN

El arándano (*Vaccinium corymbosum* L.), es uno de los cultivos de Berries que en la última década ha cobrado una relevancia particular en el país, impulsado por la demanda de un sector muy importante de consumidores interesados en productos que cumplan con elevados estándares de calidad, tanto por su aporte nutricional como por sus propiedades nutracéuticas y medicinales [1]. De acuerdo con cifras de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), en 2022 el sector

de las berries en México se posicionó como el segundo rubro con mayor valor de exportación, ascendió a un millón 46 mil 264 toneladas. Las entidades federativas con mayor participación en la producción son: Michoacán, con 601 mil 416 toneladas (57.5 % del total); Jalisco, con 175 mil 632 toneladas (16.8 %); Baja California, con 129 mil 125 toneladas (12.3 %); mientras que el restante se genera en Guanajuato y Sinaloa [2]. Esta situación ha fomentado el interés de los investigadores por ofrecer estrategias adecuadas a agricultores, gremio frutícola, comercializadores exportadores sobre las técnicas sustentables de cultivo y manejo de esta especie frutícola, dentro de las técnicas, uno de los principales factores que determinan el éxito o fracaso del sistema de cultivo es el sustrato.
En el ámbito de los sustratos empleados como medio de crecimiento, la mayoría de las investigaciones se han centrado en especies ornamentales. Entre los sustratos de uso más frecuente se incluye la turba (peat moss), la tierra de monte, la arena de río, la perlita, la vermiculita, la agrolita y las compostas, entre otros [3].

A nivel mundial, un material que ha sido de amplio uso es el residuo del coco, conocido como polvo de coco o *coco dust*, el cual se perfila como un potencial sustituto de la turba, fundamentalmente por motivos ambientales. Aunque este sustrato presenta propiedades físicas y químicas favorables, la mayoría de los estudios señalan como limitaciones su elevada salinidad y su heterogeneidad, atribuibles tanto al proceso de molienda o desfibrado de la cáscara como a su procedencia [4].

La elevada porosidad de la fibra de coco propicia una adecuada aireación y una eficaz retención hídrica en el entorno radicular, creando condiciones óptimas para el desarrollo de las raíces y favoreciendo la absorción de agua y nutrientes esenciales. Su notable capacidad de retención de humedad disminuye la necesidad de riegos frecuentes, resultando especialmente ventajosa en cultivos intensivos y zonas con escasez hídrica. El sustrato presenta un pH comprendido generalmente entre 5,5 y 6,5, rango considerado idóneo para la mayoría de los cultivos hortícolas, al promover la biodisponibilidad de nutrientes y reducir la necesidad de correcciones químicas. Por último, un procesado adecuado garantiza que la fibra de coco sea un sustrato libre de plagas y patógenos, lo que minimiza los riesgos fitosanitarios [5].

En el ámbito de los sistemas hidropónicos y la agricultura protegida, la fibra de coco destaca por su notable adaptabilidad. Su elevada resistencia a la compactación, junto con una tasa reducida de descomposición, garantiza la estabilidad física del sustrato durante ciclos productivos extensos. Entre las especies cultivadas con mayor frecuencia bajo condiciones controladas en estos sistemas se incluyen el tomate (*Solanum lycopersicum*), el pepino (*Cucumis sativus*), el pimiento (*Capsicum annuum*) y la fresa (*Fragaria × ananassa*). Desde el punto de vista ambiental, el uso de fibra de coco contribuye a mitigar el impacto derivado del empleo de sustratos no renovables, alineándose con los principios de la agricultura sustentable y la economía circular mediante el aprovechamiento de residuos generados por la industria del coco [6,7]. Por consiguiente, su integración en sistemas agrícolas constituye una estrategia eficiente para mejorar las propiedades del medio de cultivo, potenciar el desarrollo radicular y fomentar modelos de producción con mayor sostenibilidad.

Las propiedades físicas de los sustratos o medios de cultivo son determinantes para su correcta utilización y afectan de forma importante el rendimiento potencial del cultivo, dado que representan el entorno donde se desarrollan las raíces, las cuales juegan un papel clave en el crecimiento y la evolución de las plantas. Un sustrato ideal debe adaptarse a los requerimientos de nutrientes, humedad y oxígeno de la planta que se quiere reproducir, de modo que ofrezca un buen anclaje, garantice una adecuada retención de agua y ventilación, sea económico, fácil de conseguir y no desprenda compuestos nocivos que perjudiquen la instalación y el desarrollo del vegetal[8]. Sin embargo, el alto costo e impacto ambiental de materiales tradicionales como la turba, la perlita y la lana de roca ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles.

Estos tipos de sustratos en algunas ocasiones resultan inaccesibles para el pequeño productor del campo. Por esta razón, se vuelve indispensable contar con materiales producidos a nivel local, que sean estables, inocuos y de calidad comprobada. Para ello, se puede aprovechar el bagazo de agave, un subproducto generado en grandes volúmenes por la industria tequilera. La reutilización del bagazo de agave como componente de sustratos agrícolas permite reducir el impacto ambiental y aprovechar sus propiedades físicas, como su alta porosidad, capacidad de retención de agua y

buen drenaje. Su composición rica en lignina y celulosa le confiere características similares a la turba, además de una lenta descomposición que favorece la estabilidad del sustrato durante el cultivo. Diversos estudios han demostrado su potencial en sistemas hidropónicos y de agricultura protegida, posicionándolo como una alternativa viable, económica y sustentable para la producción hortícola [9]. La generación de bagazo de agave representa un problema ambiental debido a la gran cantidad de residuos acumulados por la industria. Se estima que alrededor del 40 % del agave procesado termina convertido en bagazo, el cual frecuentemente es desechado a cielo abierto o utilizado únicamente como composta, provocando contaminación ambiental. Por ello, el aprovechamiento de este residuo como componente de sustratos agrícolas representa una alternativa sustentable.

Por ello, en el presente estudio se evaluaron diferentes sustratos, incluyendo fibra de coco, bagazo y una mezcla 50:50, con el objetivo de analizar su efecto sobre el crecimiento y rendimiento del arándano en la región de Los Altos de Jalisco y contribuir al desarrollo de sistemas de producción más sustentables.

TEORÍA

El arándano (*V corymbosum* L.) es una planta que pertenece a la familia Ericaceae, las características morfológicas destacan como arbustos que pueden crecer derechos o arrastrarse por el suelo, cuya altura varía entre 0,3 y 7,0 metros según la variedad. Presentan hojas alternas, caducas o perennes, y poseen una gran longevidad: en la mayoría de los casos superan los 50 años [10]. Es una planta con origen de la costa este de América del Norte domesticada para mayor calidad de frutos a principios de los años 1900 [10].
Para el cultivo de los arándanos se necesitan ciertas condiciones climáticas. Estas plantas se adaptan a distintos tipos de clima, pero requieren un periodo de frío que oscila entre 400 y 1100 horas acumuladas con temperaturas inferiores a 7.2 °C. No obstante, el calor extremo (por encima de 28-30 °C) puede dañar los frutos, provocando arrugas y quemaduras, la mejor calidad del fruto se logra con temperaturas nocturnas de 10 °C y diurnas de 26 °C, y señalan que el rango óptimo se sitúa entre 20 °C y 25 °C [11].

Para su crecimiento, el arándano requiere suelos ácidos, con un pH situado entre 4 y 5, que sean sueltos, bien porosos y ricos en material orgánico. No son aptos los terrenos con altas concentraciones de calcio o fósforo, ni tampoco los suelos calcáreos, donde suele haber carencia de fósforo. El suelo ideal debe poseer una textura ligera, un drenaje adecuado y un contenido de materia orgánica superior al 3%, lo cual favorece la retención de la humedad necesaria para un óptimo desarrollo del sistema radicular. La conductividad eléctrica (CE) ideal se sitúa menor a 1dS m^{-1}, arriba de esta escala existen problemas de desarrollo de la planta lo cual afecta directamente a la productividad y rendimiento [11].

El desarrollo del arbusto de arándano se divide en dos fases: una vegetativa y otra reproductiva. En la fase vegetativa se distinguen cuatro etapas: 1) yema vegetativa; 2) brote con entrenudos cortos; 3) alargamiento de los entrenudos y expansión de las hojas; y 4) rama nueva formada por hojas completamente desarrolladas y entrenudos largos. Por su parte, la fase reproductiva comprende seis etapas: 1) yema hinchada que dará origen a las flores; 2) apertura de la yema, dando inicio a la floración; 3) botones florales con la corola cerrada; 4) flor en plena floración, con la corola abierta; 5) caída de la corola y cuajado del fruto; y 6) fruto en estado verde [12].

Otra de sus características es que posee un sistema radical superficial y delicado, por lo que necesita medios de crecimiento con buena aireación, drenaje y capacidad de retención de humedad. Además, esta especie se desarrolla adecuadamente en condiciones ácidas, con un pH aproximado entre 4.5 y 5.5. Cuando estas condiciones no se cumplen, la absorción de nutrientes disminuye y la planta puede presentar problemas de crecimiento y productividad [13].

Debido a estas exigencias, muchos productores utilizan sistemas de cultivo en macetas o bolsas con sustratos orgánicos, ya que permiten un mejor control de las propiedades físicas y químicas del

medio de cultivo. El uso de sustratos facilita la regulación de humedad, oxigenación y disponibilidad de nutrientes, además de reducir problemas asociados con enfermedades del suelo y compactación. Uno de los materiales más utilizados como sustrato en el cultivo de arándano es la fibra de coco. Este material se obtiene de residuos de la industria del coco y posee características físicas adecuadas para el desarrollo vegetal, la fibra de coco presenta alta porosidad, buena aireación y adecuada capacidad de retención de agua, lo que favorece el crecimiento radicular y el desarrollo fisiológico de las plantas [14]

A pesar de los beneficios que ofrece este material, la fibra de coco representa un costo considerable para los productores, especialmente en sistemas de producción intensiva donde se requieren grandes cantidades de sustrato. Además, en algunas regiones su disponibilidad es limitada, lo que incrementa los costos de transporte y adquisición. Debido a esta situación, existe interés en investigar materiales alternativos que puedan sustituir parcial o totalmente la fibra de coco sin afectar el crecimiento del cultivo y teniendo resultados similares en cuanto a la producción.

Dentro de las alternativas potenciales se encuentra el bagazo, un residuo orgánico generado en procesos agroindustriales, principalmente en la industrias tequileras, el bagazo es el material fibroso que permanece después de extraer el jugo y azucares de la piña de agave. Generalmente, este residuo se utiliza como abono o simplemente se desecha, lo que puede ocasionar problemas ambientales relacionados con la masiva acumulación de materia orgánica. La generación de bagazo de agave representa un problema ambiental debido a la gran cantidad de residuos acumulados por la industria. Se estima que alrededor del 40 % del agave procesado termina convertido en bagazo, el cual frecuentemente es desechado a cielo abierto o utilizado únicamente como composta, provocando contaminación ambiental. Por ello, el aprovechamiento de este residuo como componente de sustratos agrícolas representa una alternativa sustentable [15].

Diversos estudios han demostrado que el bagazo de agave posee propiedades físicas y químicas que pueden favorecer el desarrollo vegetal, se evaluaron diferentes formulaciones de bagazo de agave composteado y encontraron características similares a las de sustratos comerciales utilizados en agricultura protegida, especialmente en propiedades relacionadas con retención de humedad, porosidad y capacidad de intercambio catiónico[16].

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

El bagazo de agave (*Agave tequilana* Weber var. azul) empleado en el presente estudio se obtuvo como residuo agroindustrial de una empresa tequilera ubicada en la región de Arandas, Jalisco, México. Por otra parte, la fibra de coco utilizada como sustrato fue adquirida en un vivero local.

Los arboles de arándanos se obtuvieron de la empresa productora de Berries Agrícola Sun Berries SA de CV, estos con una edad de 3-4 años de producción y 15 plantas en total bajo condiciones de macrotunel. En el establecimiento de los árboles, primero se realizó un trasplante en macetas de 20 L, que estas fueron desinfectadas junto al sustrato previamente. Para la distribución de agua se utilizó el diseño de un sistema de riego por goteo para cada maseta además de una motobomba para generar una presión adecuada.

Preparación y desinfección de sustratos

Para llevar a cabo el experimento, se establecieron tres tratamientos (código de tratamiento entre paréntesis): fibra de coco (FC), bagazo (B) y una mezcla 50:50 de fibra de coco con bagazo (FC+B), se utilizaron cinco unidades experimentales por tratamiento. El experimento se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, manteniendo las mismas condiciones de manejo agronómico, como lo fue, riego, fertilización y ambiente para todas las plantas, con el fin de asegurar que las diferencias observadas se atribuyeran únicamente al efecto del sustrato.

La fertilización se aplicó mediante sistema de riego de forma diaria, de acuerdo con los requerimientos del cultivo, complementándose con aplicaciones foliares de micronutrientes.

Diseño experimental y establecimiento del cultivo

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un solo factor (tipo de sustrato). Tres tratamientos, cada uno con diez tratamientos. Posteriormente se establecieron macetas individuales bajo condiciones de macro túnel.

Además, en el establecimiento, se procuró mantener las condiciones más homogéneas posibles para todos los tratamientos, de la manera que las diferencias observadas el desarrollo de las plantas, sino del tipo de sustrato en evaluación.

Manejo agronómico:

El cultivo se mantuvo bajo un manejo agronómico uniforme en todo su desarrollo. Se aplicaron riegos en periodos prolongados de acuerdo con la necesidad hídrica del cultivo, procurando una humedad estable en cada tratamiento. La fertilización se realizó mediante cálculos de necesidad del cultivo y posteriormente se aseguró la disponibilidad necesaria para su desarrollo vegetativo. Además, se monitoreo las plagas y enfermedades más comunes durante todas sus etapas fenológicas del cultivo. Y finalmente se dio seguimiento al desarrollo fenológico y registrando cambios en el mismo y comportamientos bajo condiciones de cada tratamiento.

Caracterización de los sustratos:

Se caracterizó el pH (1:10), conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de cenizas (minerales) y capacidad de campo.

Determinación de pH

La determinación del pH de cada uno de los sustratos se llevó a cabo utilizando un analizador multiparametro (Consort C3030), siguiendo la metodología establecida [17]. Se pesó 2 g de sustrato seco en un tubo Falcon de 50 mL, al cual se le añadieron 40 mL de agua destilada. Posteriormente, los tubos fueron sometidos a agitación orbital durante 10 minutos a una velocidad de 50 rpm y con un ángulo de inclinación de 15°. Finalmente, se permitió que los tubos reposaran durante 30 minutos, tras lo cual se procedió a medir el pH del sobrenadante a una temperatura de 25 °C.

Determinación de materia orgánica y cenizas

La determinación de la materia orgánica en los sustratos se realizó por método gravimétrico, siguiendo la metodología de Andrades y colaboradores [19]. Los crisoles se llevaron a peso constante (m_0) en una mufla (marca) a 400 °C durante 2 horas. Luego, se colocaron 10 g de cada muestra (previamente secadas a 105 °C) en los crisoles y se registró su peso (m_1). Las muestras fueron calcinadas en la mufla, incrementando la temperatura en intervalos de 100 °C cada 15 minutos hasta alcanzar los 400 °C, temperatura que se mantuvo por 16 horas. Finalmente, los crisoles se enfriaron a temperatura ambiente y se pesaron nuevamente (m_2). Se calculó la cantidad de materia orgánica (MO) en los sustratos, utilizado la ecuación 1:

$$\%\mathbf{MO} = \left(\frac{\mathbf{m_1 - m_2}}{\mathbf{m_1 - m_0}}\right) * \mathbf{100} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Adicional mente, el porcentaje de minerales (%minerales) en cada uno de los sustratos se calculó mediante la ecuación 2:

$$\%\mathbf{minerales} = \left(\frac{\mathbf{m_1 - m_0}}{\mathbf{m_1 - m_0}}\right) * \mathbf{100} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

Determinación de capacidad de campo

La capacidad de campo de los sustratos se determinó siguiendo un método gravimétrico basado en la saturación y posterior drenado del material. Para ello, se colocaron aproximadamente 100 g de sustrato seco en recipientes plásticos perforados en la base, los cuales fueron sumergidos en agua durante 24 horas para garantizar la saturación completa del sustrato. Posteriormente, se retiraron y se dejaron escurrir libremente a temperatura ambiente durante 2 horas, permitiendo el drenaje del exceso de agua por gravedad (López-López y colaboradores., 2018).

Finalizado el tiempo de escurrimiento, se pesó el sustrato húmedo (m_h), y luego se secó en estufa a 105 °C durante 24 horas hasta peso constante para obtener la masa seca (m_s). La capacidad de campo se calculó con la siguiente ecuación 3:

$$\textbf{Capacidad de campo } (\%) = \left(\frac{m_h - m_s}{m_s}\right) * 100 \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

Evaluación de variables agronómicas

Durante el desarrollo del cultivo se evaluaron las siguientes variables, para el sustrato como: materia orgánica, capacidad de campo, densidad real, densidad aparente y porosidad. Para las plantas de crecimiento y producción, incluyendo altura y diámetro de planta, número de flores y frutos por planta, así como el contenido de clorofila mediante lecturas SPAD y medición de área foliar, con el objetivo de determinar el desempeño de cada tratamiento y el potencial del bagazo como alternativa sustentable en sistemas intensivos de producción de arándano (figura 1).

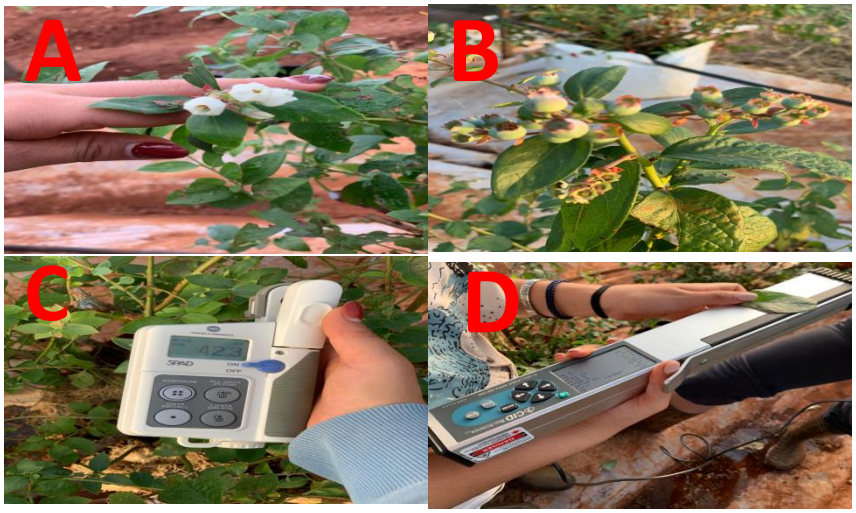


Figura 1. Toma de datos de las diferentes variables a evaluar: A (#flores); B (#frutos); C(SPAD) y D(área foliar).

RESULTADOS

Los resultados mostraron algunas diferencias entre los sustratos evaluados, entre los que destacan los siguientes: la fibra de coco (FC) presentó el mayor contenido de materia orgánica (91.13 %), seguida por la mezcla BA:FC (88.74 %) y el sustrato BA (84 %). Asimismo, FC registró la mayor capacidad de campo (78 %), mientras que BA:FC y BA presentaron valores de 70 % y 69 %, respectivamente. La densidad real osciló entre 0.6 y 0.9 g/cm³, siendo mayor en FC y menor en BA

Tabla 1. Variables vegetativas y de rendimiento en plantas de arándano en distintos sustratos: fibra de coco (FC), bagazo (BA) y una mezcla (BA:FC) 50:50 porcentual de ambos sustratos.

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Clorofila (SPAD)	N° de ramas	N° de frutos
FC	**69.00 ± 12.43a**	**52.74 ± 6.52a**	**106.40 ± 13.22a**	**48.00 ± 9.47b**
BA	**63.40 ± 7.53a**	**47.74 ± 3.11a**	84.60 ± 17.56b	24.00 ± 1.13c
FB 50/50	**67.00 ± 9.77a**	**49.86 ± 4.68a**	84.40 ± 9.07b	63.00 ± 8.06a

En variables fisiológicas (tabla 1), el contenido de clorofila, medido en unidades SPAD (Soil Plant Analysis Development), fue mayor en FC (52 SPAD), seguido por FB (50 SPAD) y BA (47 SPAD) (figura 2). La altura de planta también fue superior en FC (69 cm), seguida por FB (67 cm) y BA (64 cm). En cuanto al número de frutos, BA presentó el menor valor (13 frutos por planta), FC registró 17 frutos, mientras que la mezcla FB mostró el mayor rendimiento con 26 frutos por planta (figura 3). Finalmente en la variable de floración, el sustrato FB produce la mayor cantidad de flores durante el ciclo, alcanzando un pico máximo de alrededor de 18 flores por planta cerca del 9 de noviembre, y luego comienza una fuerte caída de alrededor de 7 flores. Por el contrario, el sustrato BA, tuvo un pico máximo de 8 flores a inicios del mes de octubre, con una perdida a mediados de noviembre (figura 4).

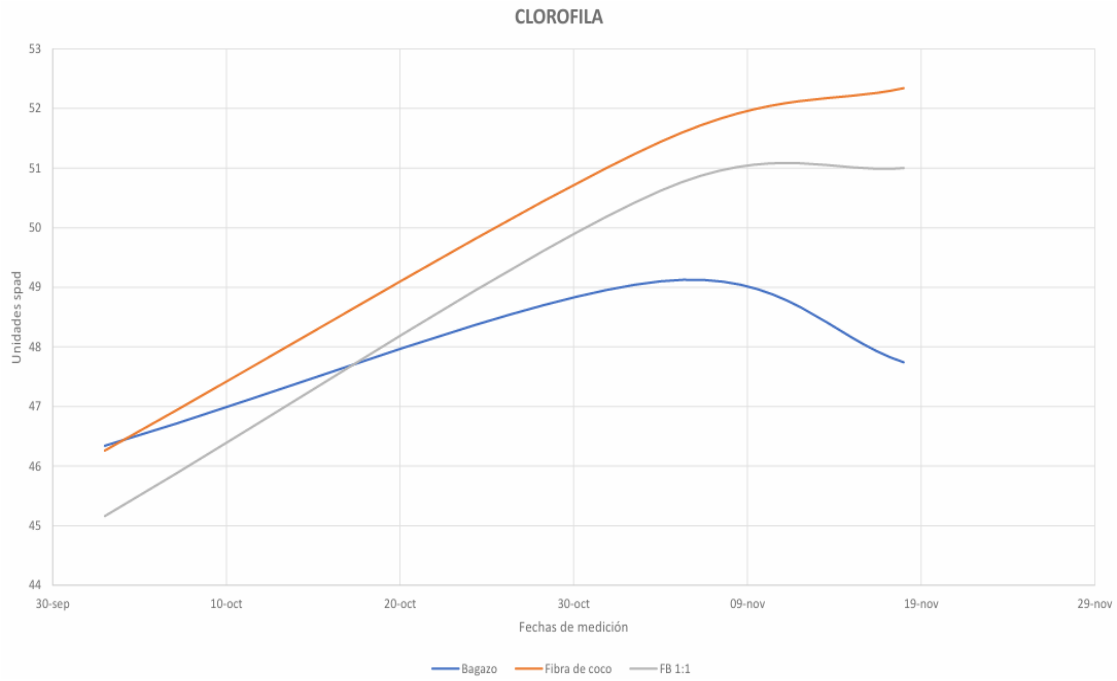


Figura 2. Cinética de índice de clorofila (unidades SPAD) para los tratamientos de fibra de coco, bagazo y una mezcla 50:50 porcentual de ambos sustratos.

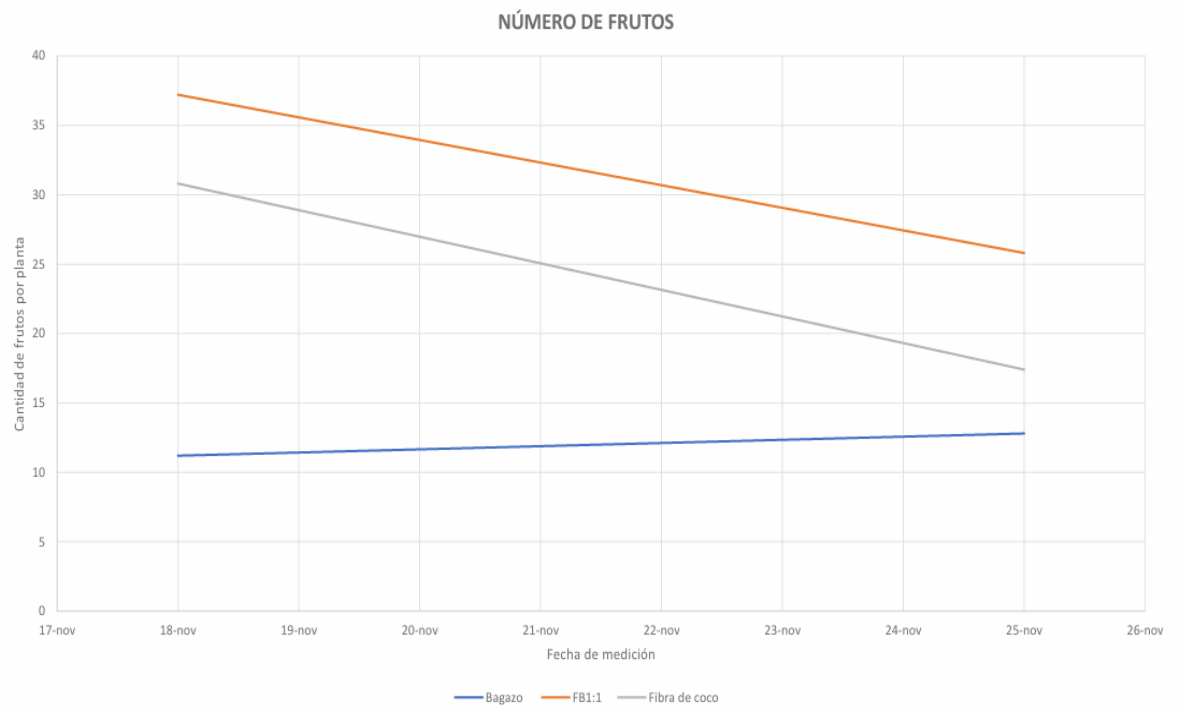


Figura 3. Cantidad de frutos por planta y su evolución medida del 18 al 25 de noviembre.

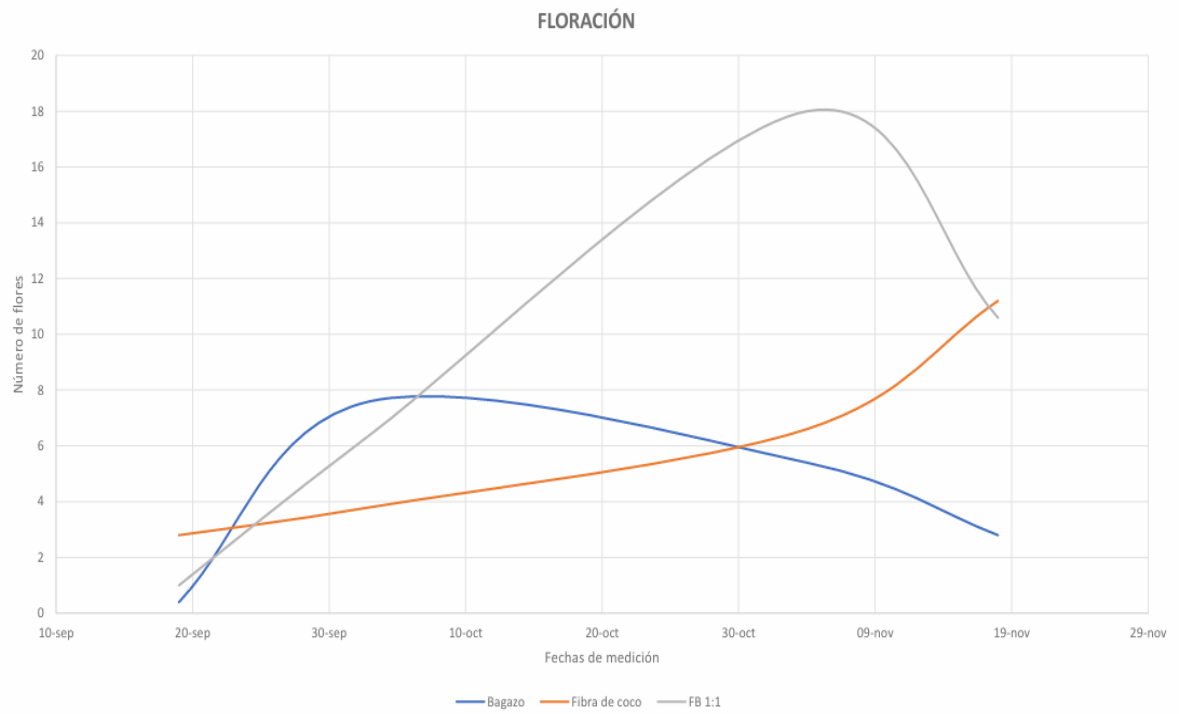


Figura 4. Número de flores por planta, son tomados desde finales de septiembre hasta mediados de noviembre.

CONCLUSIÓNES

Con base a los primeros resultados obtenidos, se confirma que el sustrato compuesto por fibra de coco (FC) presenta las mejores propiedades fisicoquímicas: mayor contenido de materia orgánica (91.13 %), capacidad de campo (78 %) y valores superiores en altura de planta (69 cm) y clorofila (52.74 SPAD). No obstante, estas ventajas no se tradujeron en el mayor rendimiento productivo. El tratamiento con mezcla 50:50 de bagazo de agave y fibra de coco (BA:FC) superó significativamente al resto en número de frutos por planta (63 frutos, frente a 48 de FC y 24 de BA), así como en la producción de flores a lo largo del ciclo. El bagazo solo (BA) mostró el desempeño más bajo en casi todas las variables evaluadas, lo que indica que sus limitaciones (menor retención de humedad y nutrientes) deben ser compensadas con otros materiales.

En conclusión, el bagazo de agave no es un sustituto completo de la fibra de coco, pero sí un excelente complemento en mezcla 1:1. Esta combinación aprovecha un residuo agroindustrial abundante en la región de Los Altos de Jalisco, reduce la dependencia de sustratos comerciales costosos y disminuye el impacto ambiental por acumulación de bagazo. Además, el aumento en la fructificación sugiere un posible efecto sinérgico que merece ser estudiado a mayor profundidad. Por lo tanto, la mezcla 50:50 se postula como una alternativa sustentable, económicamente viable y técnicamente prometedora para el cultivo de arándano en sistemas intensivos, siempre que se mantenga un manejo agronómico adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

1.González-Razo, F., Rebollar-Rebollar, S., Hernández-Martínez, J., Morales-Hernández, J.L., Ramírez-Abarca, O. (2019). Situación Actual Y Perspectivas De La Producción De Berries En México. Revista Mexicana de Agronegocios, (44), 260-274.
2.Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). Informe anual 2022. https://www.sader.gob.mx/informes/anuales/
3. Kaciu, S.; Fetahu; S.; Aliu; S.; Ramadani, S and I. Rusinovci. 2009. Influence of different types of substrates in growth intensity of seedlings for different hybrids. Sjemenarstvo. 26:47-54.
4. Noguera, P; Abad, M; Noguera, V; Puchades, R; Maquieira, A. 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically friendly peat substitute. Acta Hort. 517:279-288.
5. Sengupta, S; Basu, G. 2016. Properties of Coconut Fiber. *In* Saleem, H (ed.). Reference module in materials science and materials engineering. Oxford, Elsevier. p. 1-20.
6. López-Baltazar, J; Méndez-Matías, A; Pliego-Marín, L; Aragón-Robles, E; Robles-Martínez, ML. (2013). Evaluación agronómica de sustratos en plántulas de chile 'onza' (*Capsicum annuum*) en invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (6):1139-1150.
7. López-Pérez, L; Cárdenas-Navarro, R; Lobit, Philippe; Martínez-Castro, O; Escalante-Linares, O. (2005). Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. Revista Fitotecnia Mexicana. 28 (2): 171– 174.
8. Hartmann H, Kester D, Davies F, Geneve R.(2002). Plant propagation: principles and practices. 7a ed. Prentice Hall, Saddle River, NJ. pp 919.
9. Crespo González, M. R., González Eguiarte, D. R., Rodríguez Macías, R., Ruiz Corral, J. A., & Durán Puga, N. (2018). Caracterización química y física del bagazo de agave tequilero compostado con biosólidos de vinaza como componente de sustratos para cultivos en contenedor. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 34(3).
10. Peñuelas Montoya, F., Sánchez Portillo, J. F., Ruiz Martínez,F., y Fuentes Verduzco, C. 2024. Morfología de la planta de arándano *Vaccinium corymbosum* L. cv. "Biloxi" bajo mallas fotoselectivas en Sinaloa, México. Temas Agrarios 29(2):151- 170. https://doi.org/10.21897/ynpsv266
11. Gonzáles, A., Riquelme, J., France, A.,Uribe, H., Morales, A. y Becerra, C. (2017). Manual de manejo agronómico del arándano. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 98 pp
12. Pescie, M. A., & Lopez, C. G. (2007). Inducción floral en Arándano Alto del Sur (Vaccinium cory). RIA, 36, 97-98.

13. García, J. C., García, G., & Ciordia, M. (2018). *El cultivo del arándano en el norte de España*. Gobierno de Serida. Asturias, España. 194 pp.
14. González-Pérez, J., San-Martín-Hernández, C., Becerril-Román, A., Jiménez, Arévalo-Galarza, Ma. De Lourdes., Velasco-Cruz, Ciro. (2025). Evolución de las características físicas de sustratos empleados en el cultivo hidropónico de arándano. Agro-Divulgación, 5(1).
15. A., del Real Laborde, J. I., & Torres Morán, J. P. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4(8), 1161-1173.
16. Rodríguez Macías, R., Alcántar González, E. G., Iñiguez Covarrubias, G., Zamora Natera, J. F., García López, P., Ruiz López, M. A., & Salcedo Pérez, E. (2010). Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. Interciencia, 35(7), 515-520.
17. Beretta. A., Bassahum, D & Musselli, R. (2014). ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?. Agrociencia Uruguay, 18 (2),90-94.
18. Andrades, R. M., Moliner, A. A. & Masaguer, R. A. (2015), Prácticas de edafología; Métodos didácticos para análisis de suelos, Universidad de la Rioja, España, 47 – 61.

USO DEL BAGAZO DE AGAVE (*Agave Tequilana Var. Weber Azul*) DESECHADO DE LA PRODUCCIÓN DE TEQUILA PARA EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS DE *Capsicum Annuum Var Poblano* EN MACROTÚNEL

Joel De Jesús Barba Franco[1 y 2], Fernando Guadalupe Aviña González[2], Gabriela Guadalupe Hernández Rodríguez[2], Brayan Ruvalcaba Sanchez[2], Carlos Iván Cruz Cárdenas[2 y 3], Nancy Santiago Hernández[2] y Cesar Salvador Magaña Martinez[2*]

[1]Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Lagos, [2] Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas, [3]Centro Nacional de Recursos Genéticos - Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

cesar.magana@arandas.tecmm.edu.mx

RESUMEN

El incremento de la agricultura protegida ha impulsado el uso de sustratos comerciales como fibra de coco y turba, los cuales presentan limitaciones relacionadas con su costo y disponibilidad. La industria tequilera genera grandes cantidades de bagazo de agave, residuo lignocelulósico (Celulosa, Hemicelulosa, Lignina) con potencial de aprovechamiento agrícola. El presente trabajo evaluó el uso del bagazo de agave (*Agave tequilana* Weber var. azul) como sustrato alternativo en el cultivo de chile poblano (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de macrotúnel, con el objetivo de analizar su viabilidad agronómica y su posible contribución a la valorización de residuos agroindustriales.

El experimento se estableció en el macro túnel del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Enríquez, plantel Arandas, Jalisco. Se utilizó un diseño completamente al azar con un solo factor (sustrato) y tres tratamientos: fibra de coco (FC), bagazo de agave (B) y mezcla (50/50) (bagazo–fibra de coco), con diez repeticiones cada sustrato. Se realizó la caracterización del sustrato mediante medición de pH, capacidad de campo y materia orgánica. Además, se realizó la medición agronómica de diámetro basal, índice de clorofila, altura de planta, días a floración, número de flores y promedio de peso de fruto.

En la primera etapa se caracterizó los sustratos, determinando la materia orgánica donde la FC presentó una mayor cantidad (84%), seguido por la mezcla 50/50, (88.74%) y el B (91.13%), al igual que en la capacidad de campo la FC predominó (78.07%) seguido de 50/50 (69.6%) y posteriormente el B (69.4%). Las plantas se evaluaron en variables vegetativas como la altura, en FC (25.62cm) siendo el mayor , siguiéndole 50/50 (25 cm) y con un crecimiento limitado el B (13.7cm), en la ramificación promedio también predominó la FC (16.75) acercándose 50/50 (12) y por último B (5.7); clorofila por unidades de SPAD FC y 50:50 casi igualados (56.45)-(52.38) respectivamente y B (44.69); por último los componentes de rendimiento (número de flores) FC mostró un mayor rendimiento (21.8) posteriormente 50/50 (10.4) y B (0.87), en peso de fruto domino FC (49.73g) seguido 50/50 (39.46g) y B (0). Los resultados muestran que el bagazo de agave presentó una baja productividad en lo que respecta a un buen desarrollo vegetativo comparado con la fibra de coco. Las plantas cultivadas en mezcla mostraron un desarrollo vegetativo equilibrado y producción de frutos comparable al testigo, mientras que el uso exclusivo de bagazo mostró bajo crecimiento vegetativo, esto afectó significativamente la calidad del fruto. Esto indica que el bagazo de agave posee características físicas que permiten su uso como complemento a sustratos comerciales hortícolas. Incluyendo que se tuvo un manejo de desinfección a los sustratos para evitar problemas fitopatógenos.

El 50/50 permitió un desarrollo vegetal y productivo comparable al sustrato comercial, los siguientes parámetros siendo cercanos a la FC, altura de 50/50 25 cm, por otro lado, la clorofila 52.38, mientras

que en el estado de floración un promedio de 10.4 y en producción promedio 39.46g estos resultados indican que el bagazo de agave puede emplearse como alternativa parcial en la formulación de sustratos.

INTRODUCCIÓN

La fibra de coco se ha consolidado como uno de los sustratos naturales más utilizados en la agricultura moderna debido a sus propiedades físicas, químicas y ambientales. Este material se obtiene del mesocarpio del coco, la capa fibrosa ubicada entre la cáscara y la pulpa del fruto. Su creciente uso se debe a que representa una alternativa sustentable frente a sustratos tradicionales como la turba, al ser un recurso renovable, biodegradable y reutilizable.

La fibra de coco se caracteriza por su alta porosidad, que favorece una adecuada aireación y una eficiente retención de humedad en la zona radicular. Estas propiedades permiten crear un ambiente óptimo para el desarrollo de las raíces, facilitando la absorción de agua y nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. Asimismo, presenta una elevada capacidad de retención de agua, lo que reduce la frecuencia de riego y la hace especialmente útil en sistemas intensivos y regiones con limitada disponibilidad hídrica. Su pH, generalmente entre 5.5 y 6.5, se considera adecuado para la mayoría de los cultivos hortícolas, ya que favorece la disponibilidad de nutrientes y disminuye la necesidad de ajustes químicos en el medio de cultivo. Además, cuando ha sido correctamente procesada, es un sustrato libre de plagas y patógenos, lo que contribuye a reducir riesgos fitosanitarios.

Su versatilidad ha permitido su amplia aplicación en sistemas hidropónicos y de agricultura protegida, donde su resistencia a la compactación y su lenta descomposición aseguran estabilidad física durante periodos prolongados. Entre los cultivos más comunes establecidos en este tipo de sistemas se encuentran el tomate (*Solanum lycopersicum*), el pepino (*Cucumis sativus*), el pimiento (*Capsicum annuum*) y la fresa (*Fragaria* × ananassa), todos ampliamente producidos bajo condiciones controladas.En términos ambientales, la fibra de coco contribuye a la reducción del impacto asociado al uso de sustratos no renovables, alineándose con los principios de la agricultura sustentable y la economía circular al aprovechar residuos de la industria del coco. Por ello, su incorporación en sistemas agrícolas representa una estrategia eficiente para mejorar las condiciones del medio de cultivo, optimizar el desarrollo radicular y promover sistemas de producción más sostenibles.

En este contexto, la expansión de los sistemas de cultivo bajo invernadero y sin suelo en regiones como Los Altos de Jalisco responde a la necesidad de incrementar la productividad agrícola y optimizar el uso del agua y los fertilizantes. Estos sistemas permiten un mayor control de las condiciones ambientales y nutricionales, reduciendo problemas asociados al suelo como enfermedades, salinidad y baja fertilidad. Dentro de ellos, los sustratos cumplen un papel fundamental al proporcionar soporte físico, retención de agua, aireación y disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, el alto costo e impacto ambiental de materiales tradicionales como la turba, la perlita y la lana de roca ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles.

En este sentido, el bagazo residual de la industria tequilera representa una opción prometedora como sustrato en cultivos sin suelo. Este subproducto, generado durante el procesamiento del agave para la elaboración de tequila, puede causar problemas ambientales si no se gestiona adecuadamente, debido a la acumulación de materia orgánica, la generación de lixiviados y la proliferación de microorganismos. Se estima que la producción de teqela en México en 2025 fue de 495 millones de litros de tequila lo que genero mas de 756 mil toneladas de estos residuos agroindustriales (CRT, 2025), lo que hace necesario su aprovechamiento sustentable.

La reutilización del bagazo como componente de sustratos agrícolas permite reducir el impacto ambiental y aprovechar sus propiedades físicas, como su alta porosidad, capacidad de retención de agua y buen drenaje. Su composición rica en lignina y celulosa le confiere características similares a la turba, además de una lenta descomposición que favorece la estabilidad del sustrato durante el

cultivo. Diversos estudios han demostrado su potencial en sistemas hidropónicos y de agricultura protegida, posicionándose como una alternativa viable, económica y sustentable para la producción hortícola.

TEORÍA

La agricultura protegida y los sistemas hidropónicos han experimentado un crecimiento importante durante las últimas décadas debido a su capacidad para incrementar la productividad, optimizar el uso del agua y mejorar el control de las condiciones de cultivo. En estos sistemas, el sustrato desempeña un papel fundamental al brindar soporte físico a las plantas, favorecer el intercambio gaseoso, retener agua y nutrientes, así como permitir un adecuado desarrollo del sistema radicular (Raviv *et al*., 2019).

Entre los sustratos más utilizados destaca la fibra de coco, un material orgánico obtenido del mesocarpio del fruto del cocotero. Su popularidad se debe a su elevada capacidad de retención de agua, adecuada porosidad, estabilidad estructural y origen renovable, características que favorecen el crecimiento vegetal en diversos cultivos hortícolas (Barrett et al., 2016). Sin embargo, el incremento en la demanda de este material ha ocasionado un aumento en sus costos de producción y comercialización, lo que ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos que permitan reducir gastos sin afectar el rendimiento de los cultivos.

Diversos estudios han demostrado que el éxito de un sustrato depende del equilibrio entre la retención de humedad y la aireación. Una capacidad excesiva de retención de agua puede disminuir la disponibilidad de oxígeno en la rizósfera, afectando negativamente el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Trejo-Téllez et al., 2013). Por ello, la combinación de materiales orgánicos e inorgánicos constituye una estrategia ampliamente utilizada para optimizar las propiedades físicas de los sustratos.

En este contexto, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ha adquirido relevancia dentro de los principios de la economía circular y la agricultura sostenible. México es el principal productor mundial de tequila, elaborado a partir de *Agave tequilana* Weber var. Azul. Durante este proceso industrial se generan grandes cantidades de bagazo de agave, residuo lignocelulósico que representa aproximadamente el 40 % del peso de la materia prima procesada (Warren-Vega et al., 2025). La acumulación de este subproducto puede generar problemas ambientales relacionados con la contaminación del suelo y agua, así como la emisión de olores y gases derivados de su descomposición.

Debido a su composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, el bagazo de agave presenta características físicas que permiten considerarlo como un material potencial para la elaboración de sustratos agrícolas (Crespo-González et al., 2013). Investigaciones previas han reportado que mezclas elaboradas con bagazo de agave presentan propiedades de porosidad, retención de humedad y densidad aparente comparables a las observadas en sustratos comerciales basados en fibra de coco o turba, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de diversas especies vegetales.

El chile poblano (*Capsicum annuum L*. var. poblano) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica y gastronómica en México. Su producción bajo agricultura protegida requiere sustratos que garanticen condiciones adecuadas para el crecimiento vegetativo y reproductivo de las plantas. Variables como altura de planta, ramificación, contenido de clorofila, floración y rendimiento constituyen indicadores ampliamente utilizados para evaluar la respuesta agronómica de los cultivos ante diferentes condiciones de manejo y tipos de sustrato.

Por lo anterior, la evaluación del bagazo de agave como componente de sustratos representa una alternativa sustentable para reducir costos de producción, promover el aprovechamiento de residuos agroindustriales y disminuir la dependencia de materiales comerciales importados. Además, su utilización contribuye a la valorización de los subproductos generados por la industria tequilera,

fortaleciendo los principios de sostenibilidad y economía circular dentro de los sistemas agrícolas modernos.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales vegetales y sustratos

El bagazo de agave (*Agave tequilana* Weber var. azul) empleado en el presente estudio se obtuvo como residuo agroindustrial de una empresa tequilera ubicada en la región de Arandas, Jalisco, México. Por otra parte, la fibra de coco utilizada como sustrato fue adquirida en un vivero local. Las plántulas de chile poblano (*Capsicum annuum* L.) se obtuvieron de un vivero comercial localizado en la ciudad de Ayotlán, Jalisco, México. En el establecimiento del cultivo se necesitaron macetas de 20 L, que fueron desinfectadas junto al sustrato previamente. Para la distribución de agua se utilizó el diseño de un sistema de riego por goteo para cada maceta además de una motobomba para generar una presión adecuada.

La nutrición del cultivo fue llevada mediante fertirriego, mediante la aplicación de UMA Violeta (13-40-13), y triple 20 (20-20-20) . Además, el manejo fitosanitario se realizó mediante el uso de Full-Gro (Cloruro de Dimetil Alquil Bencil Amonio Dimetil 15%-Dioctil Decil Cloruro de Amonio 10%) con una dosificación de 9.5 ml / L de agua con la finalidad de evitar el desarrollo de hongos, principalmente en el sustrato. Los experimentos se llevaron a cabo en el macro túnel del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Arandas.

Preparación y desinfección de sustratos

Previamente al establecimiento de las plantas de chile, los sustratos se desinfectaron con el objetivo de reducir la presencia de patógenos y evitar problemas fitosanitarios en el desarrollo del cultivo. Continuamente se prepararon tres tratamientos, fibra de coco (FC), bagazo de agave (B) y una mezcla en proporción 50:50 (bagazo–fibra de coco). Siendo totalmente homogeneizados manualmente asegurando una distribución uniforme en la maceta antes del uso en el experimento.

Diseño experimental y establecimiento del cultivo

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un solo factor (tipo de sustrato) y tres tratamientos, cada uno con diez repeticiones. Posteriormente se establecieron macetas individuales bajo condiciones de macrotúnel.

Caracterización de los sustratos

Se evaluaron las propiedades de pH (relación 1:10), contenido de materia orgánica, cenizas (fracción mineral), densidad aparente, densidad real, porosidad y capacidad de campo de los sustratos.

Determinación de pH

La determinación del pH de la fibra de coco, bagazo y la mezcla se llevó a cabo utilizando un pHmetro (Consort, C3030), siguiendo la metodología establecida por Beretta y colaboradores (2014). Se pesó 2 g de sustrato seco en un vaso de precipitado de 50 mL, al cual se le adicionaron 40 mL de agua destilada. Posteriormente, los tubos fueron sometidos a agitación orbital durante 10 minutos a una velocidad de 50 rpm y con un ángulo de inclinación de 15°. Finalmente, se permitió que los tubos reposarán durante 30 minutos, tras lo cual se procedió a medir el pH del sobrenadante a una temperatura de 25 °C.

Densida aparente y real

La densidad aparente de los sustratos se determinó de acuerdo con la metodología descrita por Andrades *et al.* (2015). Las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C durante 24 h hasta peso

constante. Posteriormente, se colocaron en un cilindro de volumen conocido y se registró la masa del material contenido. La densidad aparente se calculó como la relación entre la masa seca del sustrato y el volumen ocupado, utilizando la ecuación 1.

$$\rho a = \frac{M_{cs} - M_{cv}}{V_c} \quad \textbf{Ecuación 1}$$

Donde:
Mcs: masa del cilindro con sustrato
Mcv: masa del cilindro vació
Vc: volumne del cilindro

Además, la densidad se define como la relación entre la masa de un material y el volumen que ocupa (Blake, 1986). Para determinar la densidad real de los sustratos se empleó un picnómetro de 30 mL, instrumento de volumen fijo que permite medir con precisión la densidad de materiales sólidos (Ohanian & Markert, 2009). Inicialmente, se registró el peso del picnómetro lleno con agua destilada. Posteriormente, se adicionaron 2 g de muestra seca de sustrato al picnómetro y se eliminó el exceso de agua, obteniéndose el peso correspondiente. Con los valores registrados se calculó la densidad real del sustrato mediante la ecuación 2.

$$\rho r = \frac{M_s}{Pa + M_s - P_m} \quad \textbf{Ecuación 2}$$

Donde:

Ms: masa de la muestra seca (g)
Pa: peso del picnómetro lleno con agua (g)
Pm: peso del picnómetro con la muestra y agua (g)

Determinación de porosidad

La porosidad total del sustrato se estimó basándose en la relación existente entre la densidad aparente (ρa) y la densidad real (ρr), de acuerdo con López-López *et al*., (2018). El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación: 3:

$$porosidad = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100 \quad \textbf{Ecuación 3}$$

Determinación de materia orgánica y cenizas

El contenido de materia orgánica se determinó mediante un método gravimétrico, conforme a lo establecido por Andrades *et al*. (2015). Inicialmente, los crisoles se llevaron a peso constante (m_0) en una mufla a 400 °C durante 2 horas. Posteriormente, se colocaron 10 g de muestra previamente secada a 105 °C y se registró su masa inicial (m_1). Las muestras se sometieron a calcinación, aumentando la temperatura en incrementos de 100 °C cada 15 minutos hasta alcanzar los 400 °C, manteniéndose a esta temperatura durante 16 horas. Finalmente, los crisoles se enfriaron a temperatura ambiente y se registró la masa final (m_2).

El porcentaje de materia orgánica (%MO) se calculó con la siguiente la ecuación 4:

$$\%MO = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}\right) * 100 \quad \textbf{Ecuación 4}$$

Ademas, el contenido de minerales (%minerales) en cada uno de los tratamientos se cuantifico mediante la ecuación 5:

$$\%\boldsymbol{minerales} = \left(\frac{\boldsymbol{m_1 - m_0}}{\boldsymbol{m_1 - m_0}}\right) * \boldsymbol{100} \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

Determinación de capacidad de campo

La capacidad de campo se determinó mediante un método gravimétrico basado en la saturación del sustrato y su posterior drenaje. Se colocaron aproximadamente 100 g de sustrato seco en recipientes plásticos con perforaciones en la base, los cuales se sumergieron en agua durante 24 horas para asegurar la completa saturación del sustrato. Posteriormente, se retiraron y se dejaron escurrir libremente a temperatura ambiente durante 2 horas, permitiendo el drenaje del exceso de agua por gravedad (López-López y colaboradores., 2018).

Finalizado el tiempo de escurrimiento, se pesó el sustrato húmedo (m_h), y luego se secó en estufa a 105 °C durante 24 horas hasta peso constante para obtener la masa seca (m_s). La capacidad de campo se calculó con la siguiente ecuación 4:

$$\boldsymbol{Capacidad\ de\ campo}\ (\%) = \left(\frac{\boldsymbol{m_h - m_s}}{\boldsymbol{m_s}}\right) * \boldsymbol{100} \qquad \textbf{Ecuación 4}$$

Evaluación de variables agronómicas

Durante el ciclo de cultivo se evaluaron variables vegetativas y de rendimiento para determinar el efecto de los sustratos formulados con bagazo de agave sobre el desarrollo del chile poblano (*Capsicum annuum* L. var. poblano) bajo condiciones de macrotúnel. La altura de planta se midió desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento, mientras que la ramificación se determinó mediante el conteo de ramas principales. El índice de clorofila se registró con un medidor portátil SPAD en hojas completamente desarrolladas, permitiendo estimar de forma rápida y no destructiva el estado fisiológico y nutricional de las plantas (Uddling et al., 2007). Asimismo, se cuantificó el número de flores por planta y el peso de fruto al momento de la cosecha utilizando una balanza digital. Estas variables permitieron evaluar el comportamiento agronómico de los tratamientos y determinar la viabilidad del bagazo de agave como componente alternativo de sustratos para agricultura protegida.

Análisis estadistico

Los resultados se expresaron como media ± desviación estándar. Para la caracterización de los sustratos se utilizaron tres repeticiones, mientras que para las variables agronómicas y el contenido de clorofila se emplearon diez repeticiones por tratamiento. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para determinar el efecto de los tratamientos. Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Minitab®

RESULTADOS

Los resultados de la caracterización de los sustratos mostraron diferencias importantes entre los tratamientos evaluados (Tabla 1). El bagazo de agave presentó el mayor contenido de materia orgánica con 91.13 %, seguido de la mezcla 50:50 con 88.74 % y la fibra de coco con 84.14 %. Este comportamiento puede atribuirse a la composición propia del bagazo, ya que está formado principalmente por compuestos orgánicos que favorecen un mayor contenido de materia orgánica en comparación con otros materiales utilizados como sustrato.

Respecto a la capacidad de campo, la fibra de coco registró el valor más alto con 78.07 %, mientras que la mezcla 50:50 y el bagazo presentaron valores similares de 69.58 % y 69.40 %, respectivamente. De igual manera, la porosidad fue mayor en la fibra de coco (88.99 %) y en la mezcla 50:50 (84.52 %) que en el bagazo de agave (68.14 %). Estas características son importantes debido a que influyen directamente en la disponibilidad de agua y aire para las raíces, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Crespo-González et al. (2013), quienes encontraron que las mezclas elaboradas con composta de bagazo de agave y polvo de coco presentaron características físicas adecuadas para el crecimiento de las plantas. De manera similar, Ruvalcaba-Barrios et al. (2024) señalaron que la incorporación de bagazo de agave en mezclas para sustratos mejora propiedades físicas como la porosidad y la retención de humedad. Asimismo, Puerta et al. (2012) mencionan que la porosidad y la capacidad de retención de agua son propiedades fundamentales en los sustratos hortícolas, reportando rangos adecuados de porosidad entre 70 y 85 %. En el presente estudio, la mezcla 50:50 presentó valores cercanos a dichos rangos, además de mostrar características intermedias entre la fibra de coco y el bagazo de agave, lo que sugiere que la combinación de ambos materiales puede favorecer las condiciones físicas del sustrato.

Tabla 1: Caracterización física y química de los sustratos evaluados para la producción de chile poblano (*Capsicum annuum* L.).

Tratamiento	Bagazo (B)	Mezcla B:FC (50/50)	Fibra de coco (FC)
MO (%)	91.13 ± 0.19a	88.74 ± 1.30ab	84.14 ± 2.36b
Minerales (%)	8.87 ± 0.19b	11.30 ± 1.30ab	15.86 ± 2.36a
CC (%)	69.40 ± 1.54b	69.58 ± 1.68b	78.07 ± 1.21a
pH	6.25 ± 0.25b	6.09 ± 0.03b	5.50 ± 0.05b
Da (gr/cm^3)	0.21 ± 0.01a	0.15 ± 0.02b	0.11 ± 0.01c
Dr (gr/cm^3)	0.67 ± 0.12a	0.98 ± 0.22a	1.11 ± 0.42a
Porosidad	68.14 ± 4.28b	84.52 ± 1.49a	88.99 ± 3.29a

MO: Materia orgánica, **CC:** Capacidad de campo, **Da:** Densidad aparente, **Dr:** Densidad real

Las características agronómicas de las plantas de chile poblano fueron significativamente influenciadas por el tipo de sustrato utilizado (Tabla 2). La mezcla de bagazo de agave y fibra de coco (50:50) produjo la mayor altura de planta (34.2 cm), sin diferencias estadísticas respecto al tratamiento de fibra de coco (32.0 cm), mientras que el bagazo utilizado como único sustrato presentó una altura significativamente menor (13.6 cm). Estos resultados sugieren que la combinación de bagazo y fibra de coco proporcionó condiciones físicas más favorables para el crecimiento vegetal, al mejorar el equilibrio entre retención de agua y aireación en la zona radicular.

En cuanto a los días a floración, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, registrándose valores cercanos a 55–56 días. Esto indica que el tipo de sustrato no afectó la duración del ciclo vegetativo ni el inicio de la etapa reproductiva del cultivo. Por otro lado, el número de flores presentó diferencias significativas entre tratamientos. La mezcla bagazo-fibra de coco registró el mayor valor (31 flores por planta), seguida por la fibra de coco (17.8 flores), mientras que el bagazo de agave presentó la menor producción floral (1.88 flores). La mayor floración observada en la mezcla podría estar asociada a una mejor disponibilidad de agua y nutrientes, así como a una adecuada oxigenación de las raíces, factores que favorecen la formación de estructuras reproductivas.

Tabla 2. Características agronómicas de plantas de chile poblano en fibra de coco, bagazo y una mezcla 50:50 porcentual de ambos sustratos.

Tratamiento	Bagazo (B)	Mezcla B:FC (50/50)	Fibra de coco (FC)
Altura de planta (cm)	13.6 ± 1.51b	34.2 ± 3.03a	32.0 ± 2.12a
Días a floración	56.00 ± 2.00a	56.00 ± 1.00a	55.00 ± 1.00a
Número de flores	1.88 ± 2.77c	31.00 ± 2.44a	17.8 ± 2.16b

Los resultados se presentan como media ± desviación estándar (n = 10). Letras diferentes dentro de cada fila indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos indican que el uso exclusivo de bagazo de agave limita el crecimiento y desarrollo del cultivo, posiblemente debido a propiedades físicas menos adecuadas para la producción hortícola, como una menor estabilidad estructural o un desequilibrio en la relación agua-aire. Sin embargo, cuando se empleó en combinación con fibra de coco, el bagazo mostró un desempeño agronómico comparable e incluso superior al tratamiento testigo en algunas variables. Esto sugiere que el bagazo de agave puede utilizarse como componente alternativo de sustratos comerciales, contribuyendo al aprovechamiento sustentable de residuos agroindustriales y a la reducción de costos en sistemas de agricultura protegida.

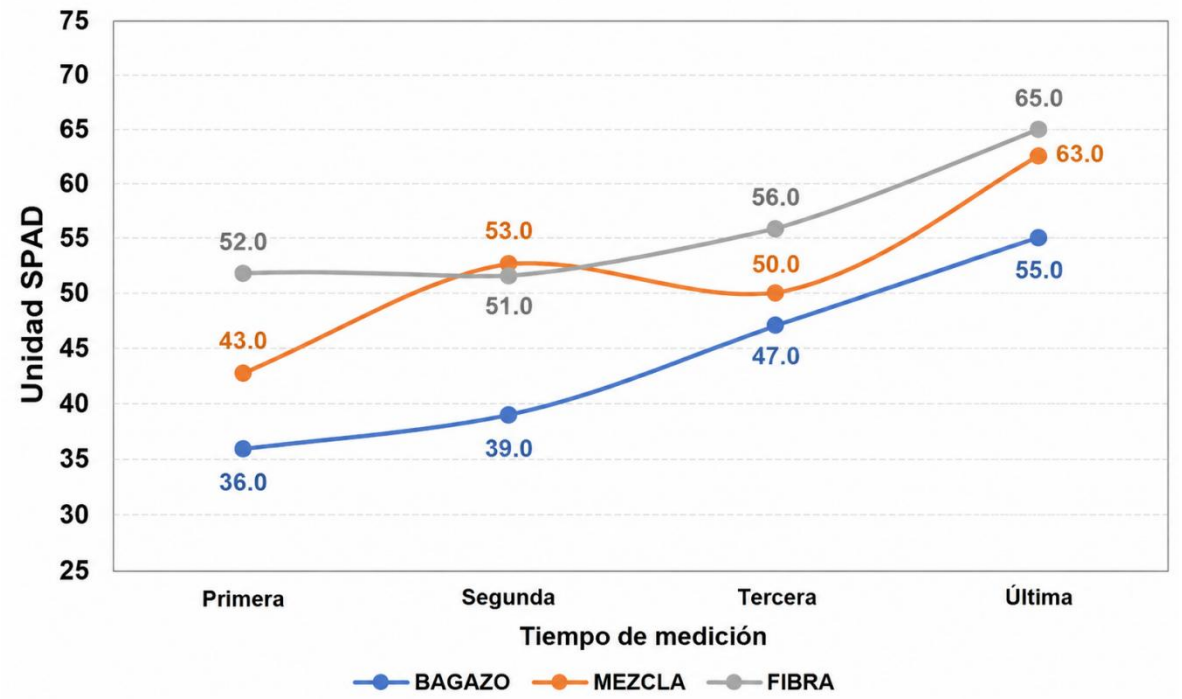


Figura 1: Cinética de contenido de clorofila (unidades SPAD de plantas de chile poblano desarrolladas en fibra de coco, bagazo y una mezcla 50:50 porcentual de ambos sustratos.

El índice SPAD presentó un incremento progresivo en los tres tratamientos durante las evaluaciones realizadas cada 10 días, desde la etapa vegetativa hasta la floración (Figura 1). Este comportamiento indica una mayor acumulación de clorofila conforme avanzó el desarrollo fisiológico de las plantas, lo que está relacionado con el aumento de la actividad fotosintética y la demanda de nutrientes durante la transición hacia la etapa reproductiva. El tratamiento con fibra de coco registró los valores más altos durante la mayor parte del periodo de evaluación, alcanzando 65 unidades SPAD en la última medición, mientras que la mezcla de bagazo de agave y fibra de coco presentó valores intermedios que finalizaron en 63 unidades SPAD. Por su parte, el bagazo de agave mostró los

valores más bajos, aunque mantuvo una tendencia ascendente constante, pasando de 36 a 55 unidades SPAD, al respecto, Zermeño *et al.* (2019) encontraron valores similares (57 unidades SPAD) en plantas de chile poblano en macrotúnel.

Estos resultados sugieren que la fibra de coco proporciona condiciones favorables para la absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno, elemento estrechamente relacionado con la síntesis de clorofila. Sin embargo, la respuesta observada en la mezcla indica que el bagazo de agave puede incorporarse como componente del sustrato sin afectar considerablemente el estado fisiológico de las plantas. El incremento de las unidades SPAD durante el crecimiento vegetativo y la floración coincide con lo reportado por Uddling *et al.* (2007), quienes señalaron que este índice se relaciona positivamente con el contenido de clorofila y la capacidad fotosintética de los cultivos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron identificar diferencias importantes entre los sustratos evaluados. El tratamiento compuesto únicamente con bagazo de agave presentó un menor desarrollo vegetativo y productivo, reflejándose en las variables evaluadas como altura de planta, ramificación, índice de clorofila y producción. Esto indicando que por sí solo el bagazo de agave no proporciona las condiciones más adecuadas para el desarrollo del cultivo de chile poblano bajo las condiciones evaluadas.

Sin embargo, la mezcla 50/50 de bagazo de agave y fibra de coco mostró resultados cercanos a los obtenidos con el sustrato comercial, manteniendo un crecimiento comparable.Esto indica que la combinación de ambos materiales permite aprovechar sus propiedades físicas y químicas del bagazo sin afectar de manera drástica al desarrollo y rendimiento del cultivo.

En general esto sugiere que el bagazo de agave puede utilizarse como complemento parcial de sustratos comerciales, representando una alternativa sustentable para el aprovechamiento de residuos agroindustriales de la industria tequilera, contribuyendo a la reducción de costos e impacto ambiental generado por los desechos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andrades, R. M., Moliner, A. A. & Masaguer, R. A. (2015), Prácticas de edafología; Métodos didácticos para análisis de suelos, Universidad de la Rioja, España, 47 – 61.
2. Barrett, G. E., Alexander, P. D., Robinson, J. S., & Bragg, N. C. (2016). Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems–A review. Scientia horticulturae, 212, 220-234.
3. Beretta, A., Bassahum, D. & Musselli, R. (2014), ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?, Agrociencia Uruguay, 18 (2), 90 – 94.
4. Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. In A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods (2nd ed., pp. 377–382). American Society of Agronomy.
5. Consejo Regulador del Tequila. (s. f.). Consejo Regulador del Tequila: Autenticidad y calidad certificada. Recuperado el 4 de junio de 2026
6. Crespo-González, M. R., González-Eguiarte, D. R., Rodríguez-Macías, R., Rendón-Salcido, L. A., del Real-Laborde, J. I., & Torres-Morán, J. P. (2013). Evaluación de la composta de bagazo de agave como componente de sustratos para producir plántulas de agave azul tequilero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4(8), 1161–1173.
7. De Boodt, M. A. V. O., & Verdonck, O. (1971, June). The physical properties of the substrates in horticulture. In III Symposium on Peat in Horticulture 26 (pp. 37-44).
8. Gruda, N. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. Agronomy, 9(6), 298. https://doi.org/10.3390/agronomy9060298

9. López-López, B., Gálvez-Arce, P., Calleja-Peláez, B., Méndez-González, J., & Ríos-Camey, J. M. (2018). Sustratos orgánicos en la germinación y crecimiento de Pinus ayacahuite var. veitchii (Roezl) Shaw en vivero. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(49), 109–122. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.156
10. Puerta, A., Pire, R., Marín, M., & colaboradores. (2012). Producción de plántulas de pimentón (Capsicum annuum L.) en sustratos orgánicos a base de mezclas con fibra de coco. Revista Científica UDO Agrícola, 12(2), 298–306.
11. Raviv, M., Lieth, J. H., & Bar-Tal, A. (Eds.). (2019). Soilless culture: Theory and practice: Theory and practice. Elsevier.
12. Ruvalcaba-Barrios, J. M., Salcedo-Pérez, E., Acosta-Sotelo, L. L., Anzaldo-Hernández, J., Ordaz-Chaparro, V. M., González-Eguiarte, D. R., & Rodríguez-Macías, R. (2024). Propiedades físicas y químicas de sustratos formulados con bagazo de agave y corteza de pino sometidos a explosión con vapor. Biotecnia, 26(1), 181–190.
13. Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., y colaboradores. (2013). Evaluación de mezclas de tezontle y fibra de coco como sustratos para la producción hidropónica de fresa.
14. Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. Photosynthesis Research, 91(1), 37–46 https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17342446/
15. Warren-Vega, W. M., Fonseca-Aguiñaga, R., de la Cruz, C. F. L., Campos-Rodríguez, A., Guzmán, A. I. Z., & Cano, L. A. R. (2025). Valorization of agave bagasse as a bio-template for circular economy: Applications in energy conversion, metabolite production, and sustainable material synthesis. Biomass and Bioenergy, 197, 107797.
16. Zermeño González, Alejandro, Marroquín Morales, José Ángel, Melendres Alvarez, Aaron Isain, Ramírez Rodríguez, Homero, Cadena Zapata, Martín, & Campos Magaña, Santos Gabriel. (2019). Propiedades espectrales de la cubierta de macro túneles y su relación con el crecimiento y rendimiento del chile poblano (Capsicum annuum L.). Terra Latinoamericana, 37(3), 253-260. https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.473

CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA DE BACTERIAS AISLADAS DE TRES PUNTOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DEL AGUA DE TLACUILOTEPEC (CUAUTEPEC, PUEBLA)

María Teresa Núñez-Cardona, Adriana Vargas-Rosas, Gabriela Vázquez Silva

Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.
mtnunez@correo.xoc.uam.mx

RESUMEN

El estudio de las bacterias del agua permite, además de conocer su diversidad, también su papel en los procesos biogeoquímicos y su posible impacto en la salud animal, vegetal y ambiental, además del posible uso de estos microorganismos en procesos biotecnológicos[1]. En este estudio se hicieron aislamientos bacterianos a partir de muestras de agua de tres puntos de la red de distribución del agua que es utilizada por la comunidad de Tlacuilotepec con el fin de determinar la presencia de bacterias que pudieran impacta la salud de los habitantes de esta comunidad. Se obtuvieron muestras de agua del manantial (AM) que es el punto de origen, seguido del pozo la concha (PC) y del agua de la llave (All) de un domicilio particular (destino final). Para contar con los cultivos bacterianos, las muestras se realizaron diluyeron (solución salina al 0.8%) y con 0.1% se inocularon en cajas Petri conteniendo agar nutritivo, los cultivos fueron incubados durante 24 horas; pasado este tiempo fueron aisladas al azar las colonias bacterianas y en caso necesario se aplicó la técnica de siembra y resiembra hasta contar con cultivos puros lo cual se verificó aplicando la tinción de Gram y observaciones al microscopio óptico. Para conocer la diversidad bacteriana, además de realizar registros de su morfología, se aplicaron pruebas bioquímicas (catabolismo de: glucosa, fructosa, maltosa, sacarosa, dextrosa, manitol, lactosa, sorbitol, citrato), producción de enzimas extracelulares (lipasa, gelatinasa, amilasa y ureasa), reducción de nitritos y nitratos y su metabolismo respiratorio (aerobio o anaerobio facultativo); simultáneamente se aplicaron las mismas pruebas a cepas de colección (*Brevundimonas diminuta*, *Stenotrophomonas* sp., *Bacillus cereus*, *Bacillus nitratireducens*, *Bacillus safensis*, *Escherichia coli, Salmonella typhi)*. Con todos los resultados se elaboró una base datos en Excel, considerando que: 0=respuesta (prueba) negativa y 1=respuesta positiva: y para determinar la similitud entre los aislados y las cepas de colección, se aplicó el Indice de Similitud de Jaccard disponible en el programa Past 4.09. En total se obtuvieron 19 cultivos puros (ocho de LC: seis Gram positivos y dos Gram negativos; cinco de All: dos Gram positivos y tres Gram negativos; seis de AM: tres Gram positivos y tres Gram negativos), el análisis de similitud reveló que del AM un cultivó se relacionó con *B. cereus* (bacilo Gram positivo, anaerobio facultativo), resistente a condiciones adversas del medio y a los procesos de cocción o pasteurización de los alimentos[2]. Un cultivo de LC Gram negativo se asoció a *Stenotrophomonas* sp. (bacilo Gram negativo) distribuida apliamente en el ambiente y asociada a la rizosfera de plantas, participa en los ciclos de azufre y nitrógeno[3]. La caracterización fenotípica reveló la diversidad bacteriana en la red de distribución de agua de Tlacuilotepe y se detectó la presencia de cultivos ampliamente relacionados con especies de interés sanitario y ambiental. El registro de este tipo de bacterias amerita el análisis del agua que se utiliza en las comunidades para prevenir enfermedades de origen bacteriano en la población, ya que generalmente no hay un tratamiento previo a su uso.

INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso indispensable para el sostenimiento de la vida en la Tierra, no obstante, las actividades humanas desarrolladas zonas rurales como: la agricultura y ganadería han generado una presión significativa sobre los sistemas hídricos, afectando tanto la disponibilidad como la calidad de las aguas superficiales y subterráneas[4.] Estas alteraciones favorecen la contaminación microbiológica, lo que incrementa el riesgo de enfermedades de origen hídrico, entre los principales agentes etiológicos asociados a la contaminación del agua se encuentran bacterias patógenas como *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Bacillus cereus, Shigella, Vibrio*

cholerae,Yersinia enterocolítica, Campylobacter jejuni, Plesiomonas shigelloides, Aeromonas las cuales pueden provocar infecciones gastrointestinales y otros padecimientos en la población expuesta[5]. En este contexto, la caracterización fenotípica de bacterias presentes en el agua representa una herramienta útil para la microbiología ambiental y sanitaria, ya que permite asociar a las bacterias con cepas de colección sin recurrir inicialmente a técnicas moleculares más complejas[6]. Este enfoque facilita el monitoreo de la calidad microbiológica del agua y contribuye a la prevención de riesgos sanitarios.

TEORÍA

La contaminación microbiológica del agua es considerada uno de los problemas de salud pública más graves a nivel mundial. La OMS menciona que, en el 2022, aproximadamente 1700 millones de personas en el mundo consumían agua con bacterias de origen fecal, la presencia de estos microorganismos representa una amenaza significativa para la salud por enfermedades, entre ellas diarrea, cólera, disentería, fiebre tifoidea y la poliomielitis[7]. Se estima que este tipo de contaminación es responsable de aproximadamente 505 000 fallecimientos anuales asociados a enfermedades diarreicas [7].

Entre los agentes etiológicos se encuentran: *Escherichia coli* es utilizada como indicador de contaminación fecal en el agua, ya que su presencia muestra la posible existencia de patógenos que afectan el tracto intestinal[6]. Algunas cepas de *E. coli* son directamente patógenas y pueden provocar diarrea severa, infecciones urinarias y cuadros hemolíticos[6]. Por su parte, *Salmonella typhi* es el agente causal de la fiebre tifoidea, además de afectar a múltiples órganos es de transmisión hídrica y alimentaria, que representa un problema de salud en regiones con deficiente saneamiento[8].
Bacillus cereus es un bacilo Gram positivo, anaerobio facultativo, formador de endosporas, que se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, incluyendo el suelo, polvo y agua[2]. Esta especie es reconocida como un importante agente de intoxicación alimentaria, ya que produce toxinas termorresistentes capaces de sobrevivir a procesos de cocción y pasteurización de alimentos[9].

El evaluar la presencia microbiológica en el agua, permite evidenciar los factores o agentes que causan contaminación entre ellos: sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, nutrientes vegetales que provocan el crecimiento acelerado de plantas acuáticas sedimentos o materiales suspendidos agentes patógenos como los ya mencionados en los párrafos anteriores[10]. Para ello existen diversas técnicas como: El análisis morfológico que es el punto de partida: las bacterias se describen según su forma (cocos, bacilos, espirilos, vibrios), agrupación celular, tamaño y presencia de estructuras especiales como esporas, flagelos o cápsulas. La tinción de Gram complementa este análisis al clasificar a los microorganismos en dos grupos fundamentales: las bacterias Gram positivas, cuya gruesa pared de peptidoglicano retiene el colorante cristal violeta, y las Gram negativas, que poseen una pared más delgada y una membrana externa lipopolisacáridos que no retiene dicho colorante[11]. Esta distinción tiene implicaciones directas en la determinación de la susceptibilidad a antibióticos y en la virulencia de los organismos.

Las pruebas bioquímicas diferenciales y metabólicas amplían la caracterización al evaluar la capacidad de las bacterias para catabolizar distintos carbohidratos (glucosa, fructosa, maltosa, sacarosa, dextrosa, manitol, lactosa y sorbitol), producir enzimas extracelulares (lipasa, gelatinasa, amilasa y ureasa)[1] ya que algunas de ellas son consideradas patógenas como es el caso de la gelatinasa, lipasa y ADNasa[12] y llevar a cabo un metabolismo aerobio estricto o anaerobio facultativo. Estos perfiles metabólicos permiten distinguir géneros y especies, y reflejan tanto el papel ecológico de los microorganismos en los ciclos biogeoquímicos como su potencial patogénico.

La caracterización fenotípica de las bacterias presentes en el agua, aunque representa una aproximación inicial, constituye una herramienta accesible, económica y de gran utilidad práctica para el monitoreo microbiológico en contextos con recursos limitados. Sus resultados pueden orientar estudios moleculares más detallados y el diseño de estrategias de intervención sanitaria orientadas a la protección de la salud comunitaria.

PARTE EXPERIMENTAL

Se colectaron muestras de agua de un Manantial (AM), que es el punto de origen del agua, seguido del pozo La Concha (PC) y del agua de la llave (All) de un domicilio particular (figura 1). Con las muestras se hicieron diluciones (solución salina al 0.8%) y con 0.1 ml de estas se inocularon cajas Petri conteniendo agar nutritivo; pasadas 24 h de incubación, se aislaron colonias bacterianas y se obtuvieron cultivos puros para su caracterización fenotípica mediante registros de su morfología celular, su respuesta a la tinción de Gram, la aplicación de pruebas bioquímicas (catabolismo de: glucosa, fructosa, maltosa, sacarosa, dextrosa, manitol, lactosa, sorbitol, citrato), determinación de su capacidad de reducir nitratos y nitritos; de producir enzimas extracelulares (lipasa, gelatinasa, amilasa y ureasa) y su metabolismo respiratorio. Simultáneamente se aplicaron las mismas pruebas a cepas de colección (*Brevundimonas diminuta*, *Stenotrophomonas* sp., *Bacillus cereus*, *B. nitratireducens*, *B. safensis*, *Escherichia coli, Salmonella typhi)*. Con los resultados se elaboró una base datos (Excel), considerando que: 0=respuesta negativa y 1=respuesta positiva; para determinar la similitud entre los aislados y las cepas de colección, se aplicó el Índice de Similitud de Jaccard (disponible en Past 4.09).

RESULTADOS

Se obtuvieron 19 cultivos puros (ocho de LC: seis Gram positivos y dos Gram negativos; cinco de All: dos Gram positivos y tres Gram negativos; seis de AM: tres Gram positivos y tres Gram negativos), de estos aislados, el 68% produce ADNasa y el 53% amilasa (figura 2).

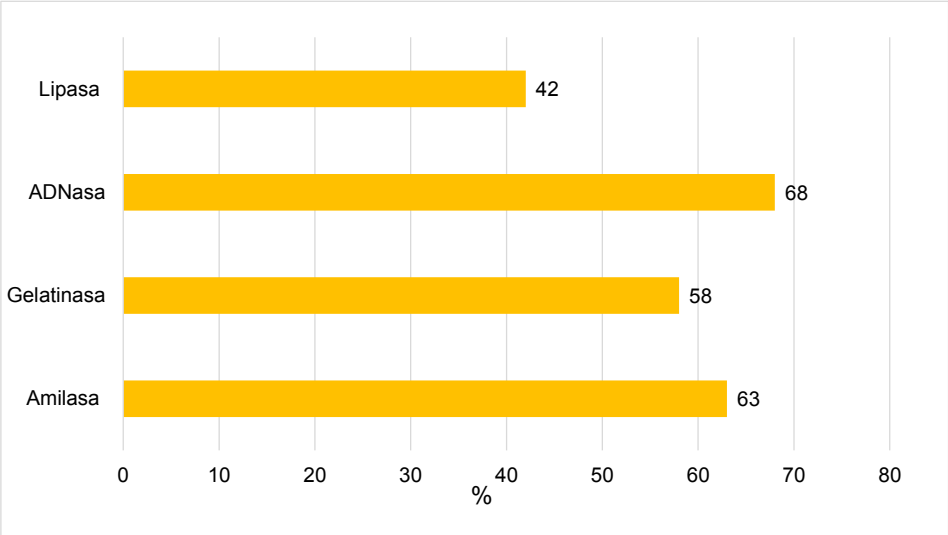


Figura 2. Número (%) de aislados productores de enzimas

El uso de las fuentes de carbono y energía, más utilizadas fueron fructosa (68%), dextrosa (63%) y glucosa (53%) (figura 3). Esta diversidad se debe a que las bacterias tienen la capacidad de metabolizar los azucares disponibles que se encuentren en su medio[13]. Mientras que el 42% de los aislados presentó un metabolismo anaerobio facultativo es decir puede desarrollarse en presencia o ausencia de oxígeno.

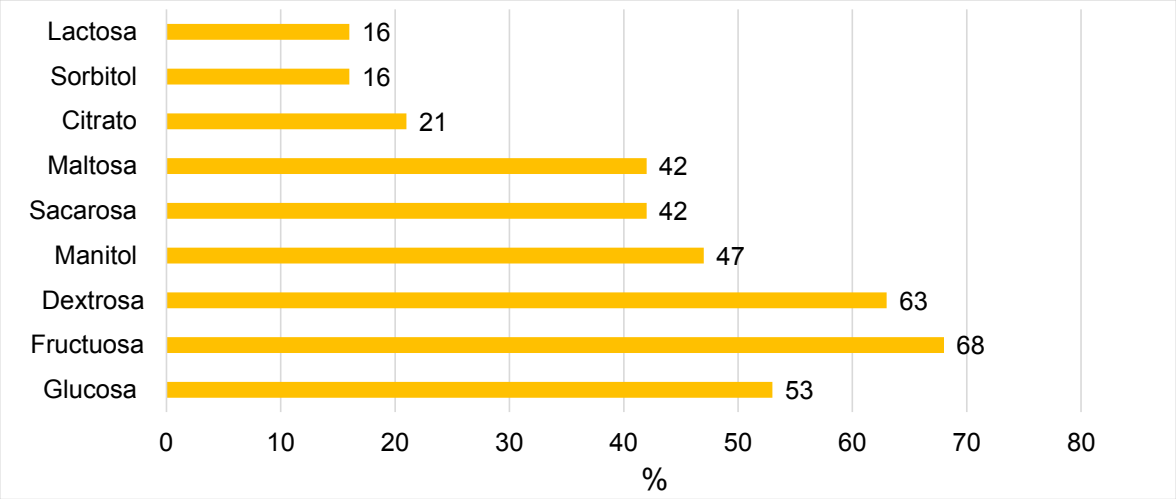
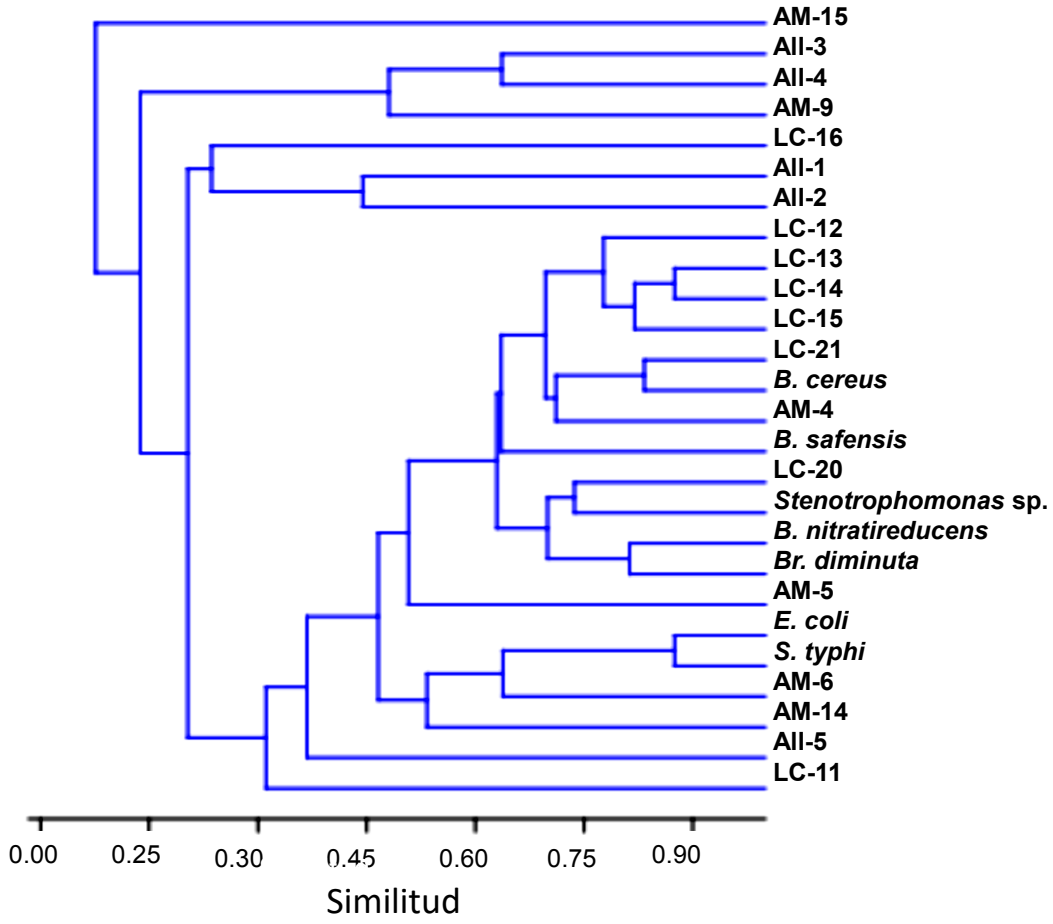


Figura 3. Número (%) de aislados que utilizan diferentes fuentes de carbono y energía

El análisis de similitud mostró que el cultivo de LC-21 se asoció con *B. cereus* (bacilo Gram positivo, anaerobio facultativo), resistente a procesos de cocción y pasteurización de alimentos; LC-20 (Gram negativo) se agrupo con *Stenotrophomonas* sp. es una bacteria Gram negativa, distribuida ampliamente en el ambiente y asociada a la rizosfera de plantas, donde participa activamente en los ciclos biogeoquímicos del azufre y el nitrógeno; aunque en condiciones normales no es considerada un patógeno, puede causar infecciones en personas con sistema inmunitario debilitado[3](figura5). Además, junto con estos cultivos se agrupan, *Bacillus nitratireducens* y *Bacillus safensis* que son otras especies del género Bacillus que han sido detectadas en ambientes acuáticos. *B. nitratireducens* participa en procesos de reducción de nitratos, lo que le confiere un papel relevante en los ciclos del nitrógeno[9]. *B. safensis*, ha sido detectado en ambientes extremos y en suelos, y generalmente no es considerado como patógeno[14], e incluyen a *Brevundimonas diminuta* un microorganismo ambiental aislado del agua, suelo y plantas, ha sido reportada como patógeno en personas con el sistema inmunológico debilitado sin embargo es utilizado en la industria para purificar desechos industriales, disminuir nitratos y estrógenos liberados al agua o niveles de CO_2 en la atmosfera[9] la presencia de estas bacterias en el agua refleja la diversidad del género Bacillus en este entorno.



Cultivos y cepas de colección	Gram	Lipasa	Gelatinasa	ADNasa	Amilasa	Ureasa	Glucosa	Fructosa	Anaerobio facultativo	Maltosa	Sacarosa	Dextrosa	Manitol	Lactosa	Sorbitol	Citrato
AII-4	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
AII-3	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LC-12	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-
LC-13	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+
LC-14	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-
LC-15	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-
LC-21	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+
B.cereus	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
AM-4	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
B. safensis	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+
LC-20	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Stenotrophomonas sp.	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
B. nitratireducens	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Brevindumonas diminuta	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
E. coli	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
S. thypi	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+
AM-6	-	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+

Figura 5. Análisis de similitud fenotípica y matriz de características bioquímicas de los aislados bacterianos y las cepas de colección con mayor similitud donde; = a positivo, = negativo

CONCLUSIONES

La caracterización fenotípica de las bacteriana aisladas de la red de distribución de agua de Tlacuilotepe mostró la presencia de bacterias relacionadas con especies de interés sanitario y ambiental, lo que evidencia la importancia de analizar el agua que se utiliza en comunidades rurales

(sin algún tratamiento) y tomar medidas preventivas para evitar enfermedades de origen bacteriano en la población

BIBLIOGRAFÍA

1. G. Bou, A. Fernández-Olmos, C. García, J. A. Sáez-Nieto y S. Valdezate, "Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología", *Enferm. Infecc. Microbiol. Clin.*, Vol. 29, 8, 2011, pp. 601–608.
2. J. Sánchez, M. Correa y L. Castañeda, "Bacillus cereus un patógeno importante en el control microbiológico de los alimentos", *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, Vol. 34, 2, 2016, pp. 230–242.
3. A. Kumar, L. Rithesh, V. Kumar, N. Raghuvanshi, K. Chaudhary, N. Abhineet and A. K. Pandey, “Stenotrophomonas in diversified cropping systems: friend or foe?”, Front. Microbiol., Vol. 14, 2023, Article 1214680.
4. N. J. Ashbolt, "Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions", *Toxicology*, Vol. 198, 1–3, 2004, pp. 229–238.
5. J. P. Cabral, "Water microbiology. Bacterial pathogens and water", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 7, 10, 2010, pp. 3657–3703.
6. M. L. Gambero, M. Blarasin, S. Bettera y J. Giuliano Albo, "Evaluación de la calidad del agua subterránea mediante la caracterización fenotípica y genotípica de bacterias Escherichia coli aisladas", *Serie Científica Katarumen. Cuad. uso manejo aguas subterráneas*, Vol. 1, 2014.
7. Organización Mundial de la Salud, "Agua para consumo humano", 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water
8. D. B. Huang y H. L. DuPont, "Problem pathogens: extra-intestinal complications of Salmonella enterica serotype Typhi infection", *Lancet Infect. Dis.*, Vol. 5, 6, 2005, pp. 341–348.
9. Y. Liu, J. Du, Q. Lai, R. Zeng, D. Ye, J. Xu y Z. Shao, "Proposal of nine novel species of the Bacillus cereus group", *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 2017.
10. M. Romero, K. F. Gómez, J. O. Sánchez y C. García-Luján, "Monitoreo de la calidad microbiológica del agua en la cuenca hidrológica del Río Nazas, México", *Química Viva*, Vol. 8, 1, 2009, pp. 35–47.
11. M. Pírez y M. Mota, "Morfología y estructura bacteriana", en *Temas de bacteriología y virología médica*, 2006, pp. 23–42.
12. A. Vargas-Rosas, M. T. Núñez-Cardona, P. Castilla Hernández y M. G. Ramos Espinosa, "Enzimas extracelulares: factores de patogenicidad en bacterias heterótrofas aisladas de agua para consumo humano en Cuautepec (Tlacuilotepec, Puebla, México)", en M. E. Sánchez Morales et al. (Eds.), *Avances científicos y tecnológicos en México II. Tomo II: Biotecnología y ciencias agropecuarias* (Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. / Temacilli Editorial, 2025), pp. 89–98.
13. J. M. Jeckelmann y B. Erni, "Transporters of glucose and other carbohydrates in bacteria", *Pflugers Arch.*, Vol. 472, 9, 2020, pp. 1129–1153.
14. Lateef, I. A. Adelere y E. B. Gueguim-Kana, "The biology and potential biotechnological applications of Bacillus safensis", *Biologia*, Vol. 70, 4, 2015, pp. 411–419.
15. M. Restrepo Escobar, P. A. Granda, C. Saldarriaga, L. F. Pinto Penaranda y C. J. Velásquez Franco, "Artritis reactiva asociada con bacteriemia por Brevundimonas diminuta", 2010.

HIDROPONÍA SOSTENIBLE PARA IMPULSAR UN JARDÍN POLINIZADOR EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CUAUTITLÁN IZCALLI

Adriana Itzel Rojas Juan[1], Daniela Cruz Monroy[1], Paula Sandoval Caudillo[1], Ivan Arroyo Ordoñez[1], Valeria Ameyal Álvarez Melchor[2]

[1]Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli, [2]Universidad Politécnica del Valle de México.
itzelrojas@outlook.com

RESUMEN

El decrecimiento en las poblaciones de insectos y aves polinizadoras ha generado una creciente preocupación debido a la importancia de estas especies en la producción agrícola y en el mantenimiento de los ecosistemas. Ante esta problemática, se planteó el desarrollo de un jardín polinizador que contribuya a fortalecer los procesos de polinización en el entorno local de la Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli. La comunidad circundante también podría verse beneficiada, ya que en las inmediaciones persiste el cultivo de maíz y se desarrollan investigaciones en el área de biotecnología verde orientadas a la sostenibilidad. Se realizó un estudio del suelo del área destinada al jardín, determinando que corresponde a un tipo arcilloso-arenoso, el cual presenta un tiempo prolongado de germinación y alta demanda hídrica. Como alternativa para favorecer el establecimiento de las plantas se diseñó un prototipo de hidroponía de bajo costo, empleando un biopolímero como sustrato y una solución nutritiva basada en lixiviado de lombricomposta, con el propósito de mantener un enfoque ecológico y sostenible. La implementación del sistema hidropónico permitió observar un crecimiento más acelerado de las plántulas en comparación con un semillero tradicional, debido a la circulación constante del agua, lo que redujo la necesidad de reemplazarla con frecuencia. El uso del biopolímero facilitó además la extracción de las radículas sin dañarlas, lo cual es ventajoso para la fase de trasplante. Estos resultados sugieren que la hidroponía representa una técnica adecuada para la continuidad del proyecto del jardín polinizador. Los resultados demostraron que los sistemas hidropónicos apoyados en materiales biodegradables y lixiviados de lombricomposta favorecen el desarrollo vegetal, dado que este tipo de abono aporta macronutrientes (N, P, K), nutrientes secundarios (Ca, Mg, S) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu, B). Asimismo, contiene ácidos húmicos y fúlvicos, microorganismos benéficos, aminoácidos y enzimas que mejoran la estructura del suelo y estimulan el crecimiento de las plantas. El estudio evidencia el potencial de esta alternativa dentro de la biotecnología verde, ya que promueve prácticas sostenibles, reduce costos y minimiza el uso de recursos naturales. Su implementación resulta apropiada para replicarse en futuros trabajos orientados al desarrollo biotecnológico.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, se ha visto en la necesidad de construir o crear sistemas que satisfagan sus necesidades alimentarias, desde la crianza de animales y la práctica de la agricultura, es importante mencionar que la agricultura es una de las actividades principales en México, según el Gobierno de México por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2021), actualmente este se encuentra en tercer lugar a nivel Latinoamérica. Destacando la implementación de sistemas hidropónicos como una alternativa sostenible para el cultivo de hortalizas, plantas polinizadoras. Ya que los espacios se han vuelto reducidos y la adaptación de estos sistemas son óptimos para su construcción en espacios pequeños.

De tal modo se busca garantizar que los cultivos se encuentren libres de plagas para la reducción del uso de agroquímicos que contaminan el agua, así mismo, se genera mayor productividad del cultivo deseado en donde se evitan pérdidas económicas y se asegura mayor calidad del producto. También la solución nutritiva es fundamental para la sustitución del suelo ya que esta aporta los nutrientes necesarios para el crecimiento y mantenimiento del cultivo.

Se propuso un prototipo que ayude a implementar un huerto polinizador con la finalidad de atraer insectos que ayudan a la flora del espacio educativo, debido a que la localidad en la que se encuentra el espacio cuenta con un suelo que retrasa la germinación de plantas y es propicio a sequías. Por lo cual, el prototipo de hidroponía es aéreo y de escurrimiento ya que ayuda a el constante riego del cultivo con la implementación de un biohilo que se degrada en un ambiente donde la humedad sea constante, las temperaturas sean cálidas mediante un proceso de compostaje, así mismo, el uso de una solución nutritiva utilizando el lixiviado de lombricomposta para la carga de nutrientes necesarios para las plantas a reproducir, esta es una propuesta accesible económicamente y amigable con el medio ambiente.

TEORÍA

La hidroponía es utilizada como sistema de cultivo, data en la época del imperio Babilónico donde se construyeron Jardines Colgantes y el sistema de riego era por gravedad. Esta es un conjunto de técnicas agrícolas que se utiliza para cultivar vegetales sin necesidad de suelo como sustrato, con la hidroponía las raíces están en contacto con la solución nutritiva que en su mayoría es agua y se le adicionan nutrientes necesarios para el desarrollo, crecimiento bajo condiciones óptimas como temperatura, humedad, luz. Las principales especies cultivadas suelen ser hortalizas, flores, plantas aromáticas y medicinales (National agricultural library, 2026).

En estos sistemas es necesario implementar medios para sostener las radículas de la planta o su proceso de germinación de las plántulas. Estos medios pueden ser inorgánicos (arena, piedra pómez, perlita, urea, entre otros), orgánicos (fibra de coco, aserrín, turba o pallets de madera) y sintéticos. Tienen varias ventajas a los sistemas convencionales entre las cuales está la mayor eficiencia en la producción de cultivos, menor tiempo de producción, control de nutrientes dependiendo de la necesidad de la planta, uso eficiente de agua, producción en áreas no aptas por factores ambientales, bajo uso de agroquímicos y aprovechamiento de espacios urbanos (Chillcce Prado, J. H. 2023).

Para evitar el uso de agroquímicos la propuesta está en el lixiviado de lombricomposta, es un líquido rico en nutrientes y microorganismos obtenido de la descomposición de restos orgánicos por la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) que garantiza cantidades considerables de nutrientes aptos para el desarrollo y crecimiento de plantas. En sistemas hidropónicos con hortalizas de bajo requerimiento nutricional, el lixiviado contiene N, P, K y micronutrientes esenciales (Fe, Zn, Cu, B), suficientes para hortalizas de baja demanda. Además, sus microorganismos benefician el sistema radicular y la retención de nutrientes. Sin embargo, los nutrientes del lixiviado no son constantes, ya que dependen de factores como la materia orgánica utilizada, el tiempo de digestión y las condiciones ambientales. Un riesgo del lixiviado es su alto contenido de microorganismos (bacterias, hongos, protozoos y virus) y materia orgánica que puede obstruir los conductos de riego o favorecer patógenos. Para evitarlo, el lixiviado debe filtrarse y diluirse correctamente con agua antes de su uso (Raymundo, E. y cols. 2025).

El uso de biohilos para el sistema hidropónico representa una alternativa innovadora y sustentable para el favorecimiento del soporte radicular y para las plantas polinizadoras este sustrato ofrece un mejor anclaje y mejor manipulación de las raíces (Orcajada, A. 2023).

Caléndula (*Calendula Officinalis*) tiene múltiples usos ornamentales, industriales y alimenticios, es considerada una planta con aplicaciones medicinales desde la antigüedad. Su importancia radica en sus principios activos, los cuales favorecen en un amplio espectro de acciones farmacológicas a las cuales se le adjudican múltiples usos en relación con la cosmética natural y los productos de higiene diaria. Sin embargo, aunque las plantas medicinales han generado mucho interés en los últimos años aún existen estudios limitados que relacionen la hidroponía con la producción de Caléndula.

Esta planta hidropónica prospera en ambientes controlados, lo que la hace ideal para el cultivo sostenible en interiores. A diferencia de la caléndula cultivada tradicionalmente en tierra, los sistemas hidropónicos ofrecen una mejor absorción de nutrientes, un crecimiento más rápido y una mayor resistencia a plagas y enfermedades (Urbano, L. 2025). El rango de pH es 5.5 a 6.2, este rango

ligeramente ácido mejora la absorción de nutrientes y previene deficiencias. El control y los ajustes periódicos de la solución nutritiva ayudan a mantener estos parámetros, garantizando sistemas radiculares fuertes y floraciones exuberantes

Requisitos ambientales para la caléndula hidropónica es crear un entorno hidropónico para la caléndula requiere un control preciso de la luz de 10 a 12 horas de iluminación al día, la temperatura estable entre 18 y 24 °C para caléndula hidropónica, y la humedad con correcta circulación de aire y control de humedad para reducir riesgo bacteriano.

Espaciamiento y germinación de semillas de caléndula deben colocarse una por cada orificio en las bandejas hidropónicas, dejando espacio suficiente para el desarrollo de las raíces. El proceso de germinación suele comenzar entre 7 y 14 días, dependiendo de las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad (Gaja, J. y cols. 2023).

De tal sentido en las revisiones que se realizaron muestran diferentes métodos y materiales usados con resultados positivos. Para esta investigación se centrará en una metodología particular con materiales convencionales.

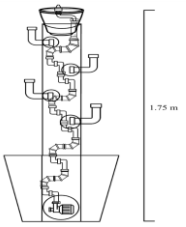
PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto se llevó a cabo dentro de la Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli, en el laboratorio de hidroponía de la universidad en donde se realizaron todas las pruebas correspondientes como se notan a continuación.

Se usaron materiales convencionales de fácil acceso y bajo costo como: un tubo de PVC de 110 mm, cubeta de 20 L con tapa, 12 codos de pvc de 38.1 mm, 1.5 m de manguera, una bomba para pecera de 5 Watts, una maceta N° 10, un tapón de PVC de 110 mm y materiales extras para la perforación y el pegado del prototipo.

Construcción del Prototipo de Hidroponía

Diseño del prototipo del sistema hidropónico



Obtención del material para el armado del prototipo



Medición para los cortes del material



Perforación del tubo PVC



Corte y perforación de los codos de PVC



Ensamblado del prototipo



Imagen 1: Diagrama de flujo de la construcción del Prototipo hidropónico.
Después de una semana se dejó secando para que fuera efectivo el ensamblado, posteriormente se comenzó a preparar la solución nutritiva con 1 L de lixiviado de lombricomposta x 10 L de agua para mantener un pH óptimo para la germinación de las semillas.

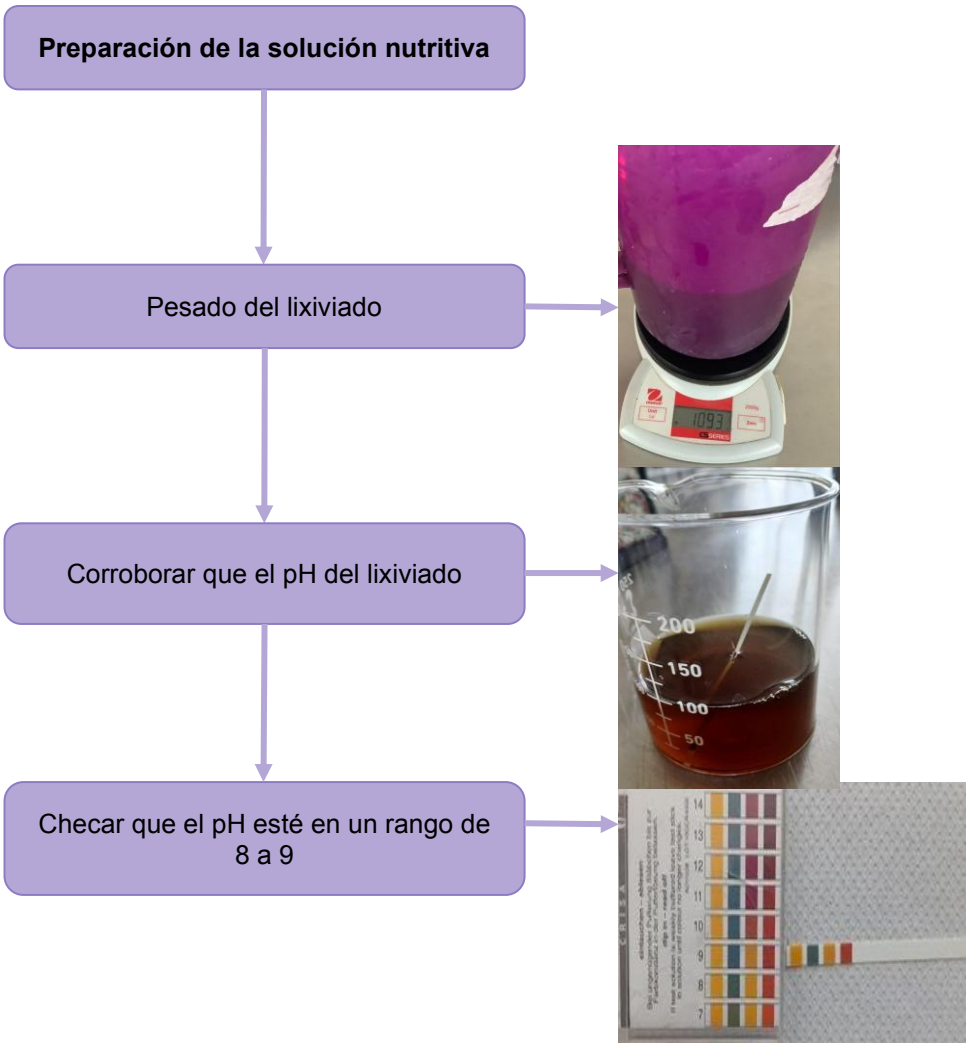


Imagen 2: Diagrama de flujo de la preparación de la solución nutritiva con lixiviado de lombricomposta.

Después de una semana de monitorear el pH y la circulación del agua, se realizaron los biohilos con 6 g de alginato de sodio, 200 ml de agua y 10 g de glicerina, para solidificar la mezcla se homogeneizó 30 g de Cloruro de calcio con 100 ml de agua.

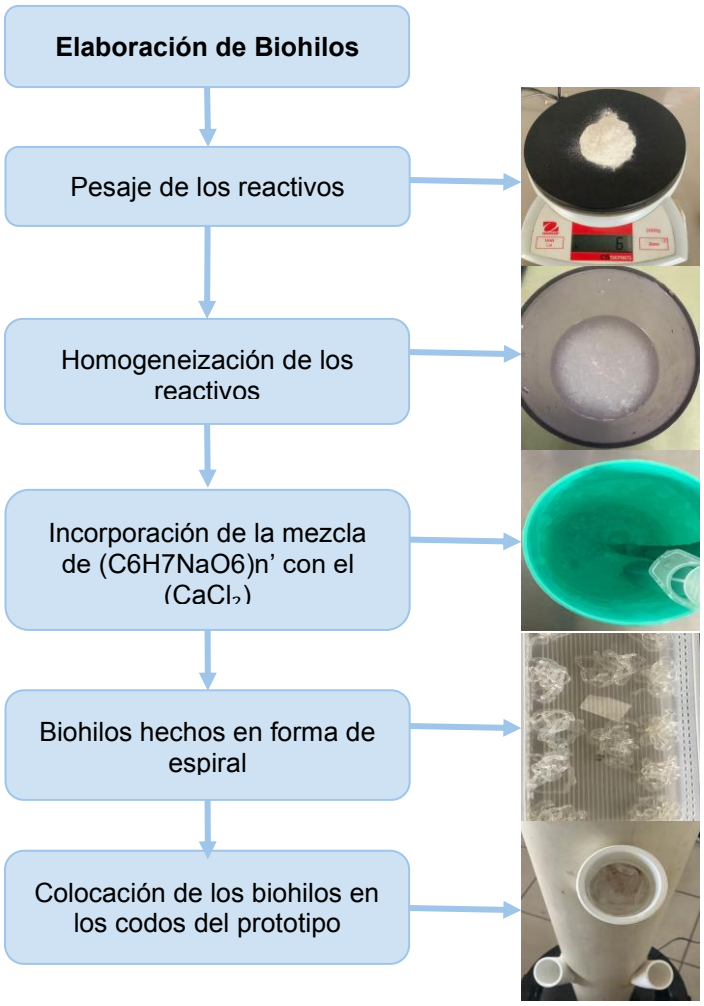


Imagen 3: Diagrama de flujo del proceso de elaboración de los biohilos y su incorporación al prototipo.

RESULTADOS

El prototipo desarrollado permitió el establecimiento y crecimiento adecuado de las plantas, esto bajo condiciones controladas como la luz, la humedad, superando las limitantes del suelo arcilloso-arenoso presentes en la zona de estudio. El uso de biohilos como sustrato favorece el enraizamiento de las plántulas, proporcionando un soporte estable y biodegradable. De la misma forma la solución nutritiva nos dió un aporte de nutrientes en los que obligaba a tener un monitoreo de su pH para evitar una solidificación por acidificación lo cual se mostró beneficioso, ya que si iba bajando el pH indicaba que la planta absorbía los nutrientes y era un indicador de que se debía agregar más solución nutritiva.

Parámetro	Observación en el sistema
Enraizamiento	Adecuado y uniforme
Desarrollo vegetal	Homogéneo
Distribución de nutrientes	Eficiente
Viabilidad del sistema	Alta
Uso del espacio	Optimizado

Tabla 1: Descripción de los parámetros que se observaron en el sistema

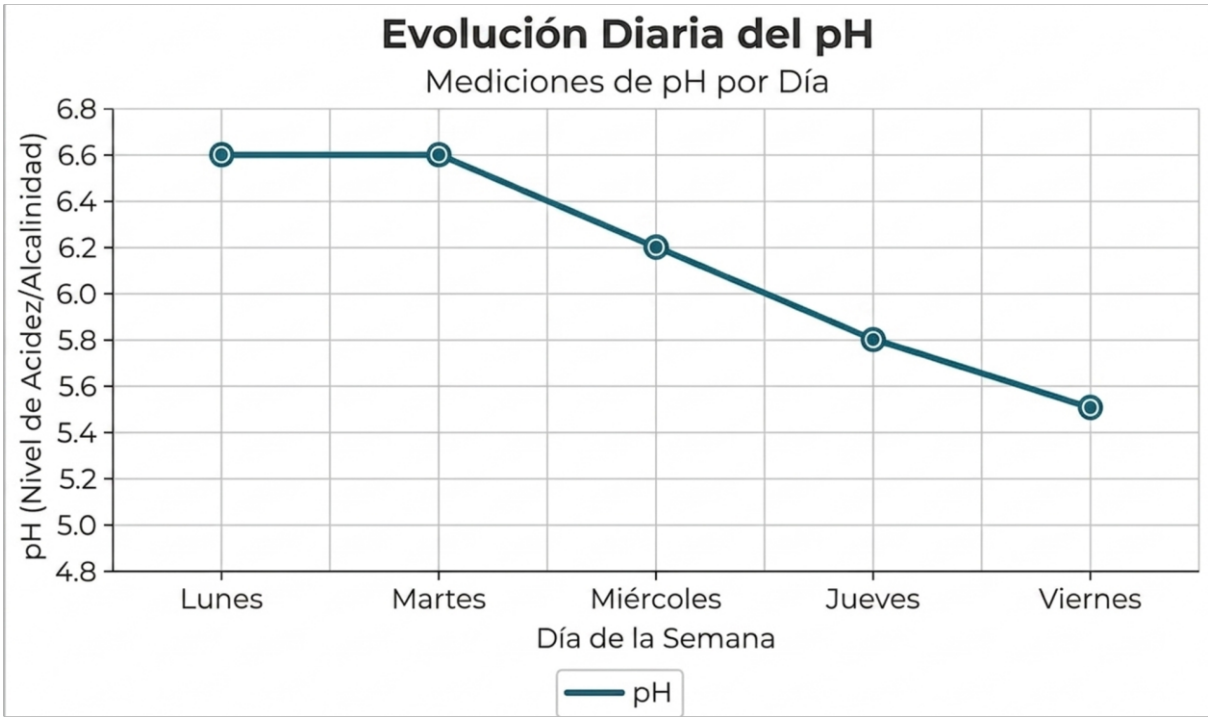


Imagen 4: Gráfica que muestra el monitoreo del pH de la solución nutritiva durante una semana.

CONCLUSIONES

La elaboración del prototipo hidropónico con lixiviado de lombricomposta y con un sustrato biodegradable demostró ser una alternativa viable, a pesar de las limitaciones para la germinación natural y el desarrollo inicial de las plantas. La incorporación de una solución nutritiva enriquecida con lixiviado de lombricomposta ayudó considerablemente al crecimiento y mantenimiento de las plantas gracias a su contenido de macro y micronutrientes. La implementación de materiales que se pueden degradar en una composta ayuda al medio ambiente. De tal modo se comparó el costo-beneficio de este prototipo, es oportuno para una implementación en espacios reducidos al igual que su bajo costo de instalación e insumos.

BIBLIOGRAFÍA

1.Chillcce Prado, J. H. (2023). Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022.

2.Raymundo, E., & Maldonado, M. (2025). El lixiviado de lombriz en el crecimiento hidropónico de hortalizas. Elementos 140. 53-56

3.Orcajada, Adele. BioMateriales. (2023, Noviembre 9). Cátedra Artesanía; CÀTEDRA D'ARTESANIA. https://catedraartesania.com/fichas/biomateriales/

4.Urbano, L. Y. (2025, enero 14). Variedades de Caléndula (*Calendula officinalis L.)* cultivadas bajo condiciones de sustrato e hidroponía. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/49975

5. Gaja, J., Bala, S., & Hugara, S. (2023). *Cultivation of medicinal plants using hydroponic system*. https://doi.org/10.52403/ijrr.20231003

6.National agricultural library. (s/f). Usda.gov. Recuperado el 5 de junio de 2026, de https://www.nal.usda.gov/farms-and-agricultural-production-systems/hydroponics

CARBONATO DE CALCIO DE ALTA PUREZA

Miguel Sampieri García[1], María Liliana Hernández Pérez[1], Elena Escobar Garduño[2], Alan Martínez Hernandez[3] y Rocio Sosa Torres[3]

Universidad Interserrana Del Estado de Puebla Chilchotla.
20239303@uich.edu.mx, maría_hernandez@uich.edu.mx, 202372018@uich.edu.mx, rocio_sosa@uich.edu.mx.

RESUMEN

La industria avícola genera grandes cantidades de cáscaras de huevo, un residuo con un valor mineral superior al 95% que representa un desafío ambiental por su lenta degradación. Bajo un enfoque de ingeniería de procesos, esta investigación describe el diseño de un protocolo para obtener carbonato de calcio (CaCO3) de alta pureza a partir de este subproducto. La metodología se estructuró en operaciones unitarias secuenciales: recolección de materia prima, disociación mecánica de la membrana interna y desinfección química mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 3% para garantizar la inocuidad microbiológica. Posteriormente, se realizó una estabilización térmica a 50 °C durante dos horas para eliminar la humedad residual. El proceso finalizó con la pulverización y tamizado del material, estandarizando el tamaño de partícula a un rango inferior a 45 µm para optimizar su reactividad en aplicaciones industriales o veterinarias. Los resultados experimentales mostraron una alta eficiencia en el balance de materia, transformando una masa inicial de 460.72 g en 451.11 g de producto final. Esto representa un rendimiento de extracción del 97.91%, con una pérdida marginal de solo el 2.09%. La caracterización físico-química validó una pureza de entre el 93% y el 96%, con niveles de humedad del 0.83%. En conclusión, se logró obtener un activo mineral de calidad técnica superior para la formulación de suplementos o pigmentos, demostrando que la ingeniería de procesos permite la valorización ecoeficiente de residuos industriales a bajo costo.

INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la cáscara de huevo representa un residuo biogénico con un contenido de carbonato de calcio de entre el 93% y 95%, cuyo manejo inadecuado en vertederos genera graves riesgos sanitarios y la proliferación de patógenos como *Salmonella*. Ante este vacío técnico, la presente investigación propone una ruta de valorización bajo el modelo de economía circular, transformando este residuo en un insumo industrial de alta calidad mediante un proceso optimizado de separación física de la membrana con agua fría, desinfección con cloro al 1% y estabilización térmica a 90 °C durante 80 minutos. Al aplicar esta metodología, se logró un rendimiento excepcional del 97.91% y una humedad residual del 1.37%, resultados que superan la eficiencia reportada por Burga (2018) y se alinean con los parámetros de estabilidad química sugeridos por Reyes-Delgado et al. (2024). La seguridad del proceso se validó mediante pruebas microbiológicas en agar LB usando la técnica de estría masiva, demostrando que la combinación de cloro al 1% y choque térmico elimina totalmente la carga bacteriana, a diferencia de métodos como el vinagre blanco, que permitieron el crecimiento de colonias. De este modo, se confirma la viabilidad técnica para obtener un polvo biogénico fino (<45 µm) apto para la fabricación de pinturas ecológicas y la fortificación de alimentos, garantizando un producto inocuo y estable a largo plazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio La investigación y las pruebas experimentales se desarrollaron en el municipio de Rafael J. García, perteneciente a Chilchotla, Puebla, México.
Diseño experimental y procesamiento técnico Se aplicó un enfoque basado en operaciones unitarias para evaluar la eficiencia de la ruta de transformación de la cáscara de huevo en carbonato de calcio

biogénico. El diseño experimental consistió en el análisis comparativo de tres métodos para cada etapa crítica del proceso:

1. Separación de la membrana interna: Se evaluaron tres variantes de inmersión para desprender el material proteico: agua fría a 5 °C, agua a temperatura ambiente ("normal") y agua caliente.
2. Métodos de higienización: Se compararon tres protocolos de desinfección para asegurar la eliminación de carga microbiana: cloro al 1%, agua hirviendo y una solución de bicarbonato de sodio con vinagre blanco.
3. Estabilización térmica (Secado): Se probaron tres condiciones en una deshidratadora para determinar el punto óptimo de estabilidad química: 50 °C por 2 horas, 90 °C por 1 hora y 20 minutos, y una prueba de control extremo a 500 °C por 1 hora y 20 minutos.

Tras evaluar el rendimiento de masa, el tiempo de proceso y la eficacia sanitaria, se determinó que la ruta técnica óptima consiste en la separación con agua fría, seguida de la desinfección con cloro al 1% y un secado controlado a 90 °C.
Evaluación microbiológica en agar LB Para validar la inocuidad del producto final bajo la ruta seleccionada, se realizaron pruebas microbiológicas utilizando agar LB (Luria-Bertani) como medio de cultivo general. El procedimiento de preparación de muestras y disoluciones seriadas se estandarizó de la siguiente manera:

- Preparación de la muestra: En tubos tipo Eppendorf de 1.5 ml, se depositaron 0.5 g de muestra de cáscara en 1 ml de agua destilada, sometiéndolos a agitación mecánica en un vortex para suspender los microorganismos.
- Protocolo de dilución: El contenido de cada tubo Eppendorf (1 ml) se trasvasó a tubos Falcon de 15 ml que contenían 9 ml de agua destilada, logrando una dilución controlada para el análisis.
- Inoculación y técnica de siembra: De cada tubo Falcon, se extrajo una alícuota de 100 microlitros (µl) mediante micropipeta. Se empleó la técnica de siembra masiva, utilizando un asa de siembra triangular de vidrio (asa Drigalsky) para asegurar una distribución uniforme del inóculo sobre la superficie de las placas de agar LB, las cuales se trabajaron por duplicado.

Las placas fueron incubadas a 37 °C durante un periodo de 24 a 48 horas para verificar la ausencia total de colonias bacterianas, garantizando que el tratamiento térmico y químico eliminó eficazmente patógenos como *Salmonella* y *E. coli*.

Tabla 1

Indicador	Resultado	Interpretación
Masa final	451.11 g	Producto recuperado después de secado, molienda y tamizado.
Rendimiento	97.91 %	Alta eficiencia técnica del proceso.
Pérdida de masa	2.09 %	Pérdida baja asociada a retiro de humedad y material orgánico.
Humedad residual	1.37 %	Evidencia de estabilización térmica adecuada.



Figura 1. Separación de membrana con agua fría.



Figura 2. Secado en deshidratadora.



Figura 3. Molienda.



Figura 4. Carbonato de calcio en polvo.

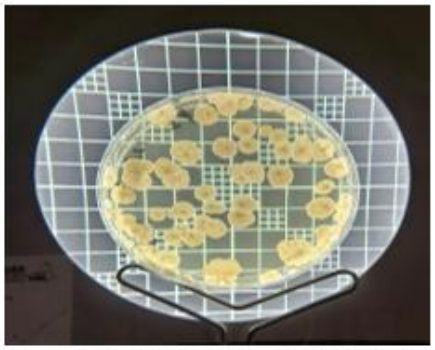


Figura 5. Cultivo 1 material sin desinfectar.

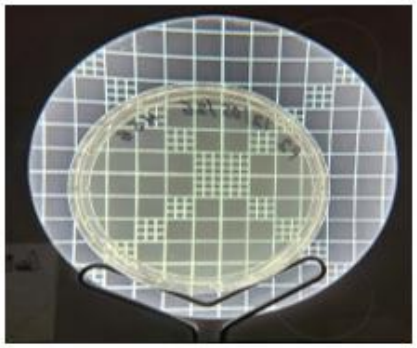


Figura 6. Placa con tratamiento a 90°C.

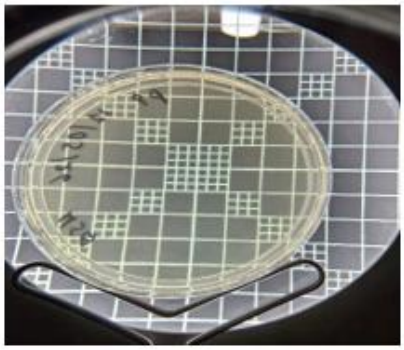


Figura 7. Placa con tratamiento de cloro al 1%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento y Eficiencia del Proceso La ruta técnica demostró una alta eficiencia con un rendimiento del 97.91%, recuperando 451.11 g de carbonato de calcio de una masa inicial de 460.74 g. Este resultado supera significativamente lo reportado por Burga Jacobi (2018), quien alcanzó un rendimiento de secado del 89.28% a 55.3 °C. Asimismo, este alto rendimiento valida la propuesta de Castañeda & Stechina (2013) sobre la eficacia de la separación física de la membrana para obtener un producto con alta pureza (hasta 96%), minimizando pérdidas de material biogénico.

Estabilización Térmica y Humedad La humedad residual de 1.37% lograda a 90 °C coincide con los valores reportados por San Martín Torres et al. (2025) para un producto estable. Este nivel de desecación es más eficiente que los resultados de Vásquez Chicaiza (2019) y se alinea con la sugerencia de Reyes-Delgado et al. (2024), quienes proponen los 90 °C como la temperatura ideal para estabilizar el residuo preservando su calidad química. Un contenido tan bajo de humedad garantiza la prevención del deterioro microbiológico mencionado por Callejas Garzón & Ramírez Gamboa (2018) en estudios de ovoproductos.

Análisis Microbiológico en Agar LB Se observó crecimiento bacteriano únicamente en las placas iniciales (sin desinfectar) y en la placa de vinagre blanco. La desinfección con cloro al 1% y el choque térmico a 90 °C eliminaron totalmente la carga microbiana. La persistencia de crecimiento con vinagre, incluso bajo disolución seriada, cuestiona su eficacia como método único de higienización sugerido en contextos caseros. Los resultados refuerzan la necesidad de métodos industriales para garantizar productos libres de patógenos, cumpliendo con las normas de calidad citadas por Cuizano Alvarón (2023) y Figueroa Loor (2022).

Valorización y Aplicación Industrial La transformación exitosa en un polvo fino cumple con las especificaciones técnicas para pigmentos de relleno analizadas por Burga Jacobi (2018) y para la fortificación de alimentos propuesta por Pérez Serrudo (2019). La integración de estos procesos no solo reduce el impacto ambiental resaltado por Cabello Pavez (2018), sino que genera un insumo con un contenido mineral robusto, similar al 92.61% de cenizas reportado por Guevara Parreño (2023).

CONCLUSIONES

Se determinó que la ruta más viable y eficiente para obtener carbonato de calcio biogénico de alta calidad consiste en la separación con agua fría, seguida de una desinfección con cloro al 1% y un secado controlado a 90 °C. Esta combinación asegura un producto inocuo, con estabilidad térmica óptima y alto potencial de aprovechamiento en la industria técnica y alimentaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Burga Jacobi, P. N. R. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cáscara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
2. Cabello Pavez, J. I. (2018). *Usos de los huevos de descarte de gallinas como ingredientes funcionales, nutritivos y tecnológicos en alimentación* [Monografía para optar al Título Profesional de Médico Veterinario, Universidad de Chile]. Repositorio de la Universidad de Chile.
3. Callejas Garzón, A. M., & Ramírez Gamboa, J. N. (2018). *Aprovechamiento de huevo deshidratado en la elaboración de un producto cárnico emulsionado* [Tesis de grado, Universidad de La Salle]. Repositorio Institucional - Universidad de La Salle.
4. Castañeda, M. T., & Stechina, D. E. (2013). *Alternativa ecoeficiente para el aprovechamiento de cáscara de huevo, residuo derivado de la industria de ovoproductos* [Objeto de conferencia]. SEDICI - Universidad Nacional de La Plata.

5. Cuizano Alvarón, J. L. (2023). *Obtención de carbonato de calcio a partir de la cáscara de huevo* [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio UNJFSC.
6. Figueroa Loor, I. H. (2024). Obtención de harina a partir de la cáscara de huevo para la elaboración de balanceado en pollos broiler etapa inicial [Trabajo de titulación de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio PUCE
7. Guevara Parreño, J. G. (2023). *Inclusión de varios niveles de cáscara de huevo como fuente de calcio en la producción de huevos de codorniz* [Trabajo de titulación de Ingeniero Agropecuario, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. Repositorio UNESUM.
8. Pérez Serrudo, G. B. (2019). Aprovechamiento de las cáscaras de huevo en la fortificación de alimentos. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, *16*(18), 29–38.
9. Reyes-Delgado, Y., & Cabrera Estrada, I. (2024). Evaluación del secado de cáscaras de huevo a escala de laboratorio para su aprovechamiento industrial. *Tecnología Química*, *44*(2), 288-300.
10. San Martín Torres, D. M., Celi Calderón, B. P., Aguilar Buele, C. N., Espinoza Galarza, H. G., Rojas Parducí, K. S., & Chamorro Molina, J. W. (2025). Obtención de harina a base de cáscaras de huevos. *Sapiens International Multidisciplinary Journal*, *2*(1), 286-304.
11. Vásquez Chicaiza, D. I. (2019). *Sustitución del Carbonato de Calcio (CaCO3) por Harina de Cáscaras de Huevo en un Balanceado para Cuyes en la etapa de Recría* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC.

ALTERACIONES MORFOLÓGICAS EN *Tetraselmis Sp.* INDUCIDAS POR GLUFOSINATO DE AMONIO, GLIFOSATO Y SU INTERACCIÓN BINARIA: IMPLICACIONES ECOTOXICOLÓGICAS EN SISTEMAS ACUÁTICOS

Alondra Alelie Cortés-Téllez[1], Ana D'ors de Blas[2], Ana Sánchez-Fortún Herrero[2], Ramón Cervantes Rivera[3], Sebastián Sánchez-Fortún Rodríguez[2], Ma. Carmen Bartolomé-Camacho[1].

[1]Facultad de Químico-Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia (México). [2]Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense de Madrid (España). [3]Facultad de Veterinaria, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia (México). alondra.cortes@umich.mx

RESUMEN

El uso de herbicidas de amplio espectro como el glifosato y el glufosinato de amonio ha sido esencial para mantener la productividad agrícola en México, especialmente en cultivos de alta relevancia como el maíz y el aguacate. No obstante, su aplicación intensiva ha generado preocupación por los efectos adversos en organismos acuáticos no objetivo, particularmente en microalgas, que constituyen la base de las redes tróficas y desempeñan un papel fundamental en la productividad primaria de los ecosistemas acuáticos. El glifosato ha sido clasificado por la IARC como probable carcinógeno y se ha asociado con disrupción endocrina y estrés oxidativo, mientras que el glufosinato se vincula con efectos neurotóxicos y reproductivos en modelos experimentales. En el caso de las microalgas, organismos clave en la base de las redes tróficas acuáticas, la exposición a estos herbicidas se traduce en alteraciones morfológicas visibles como cambios en el volumen celular, reducción en la densidad poblacional y actividad fotosintética.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar modificaciones morfológicas de *Tetraselmis* sp. expuesta a corto plazo (72 h) al glufosinato de amonio y glifosato, así como su interacción binaria. Los tratamientos se aplicaron a las concentraciones correspondientes a la concentración inhibitoria 50 y concentración máxima sin efecto observado, respectivamente (CI_{50}(72) y NOEC). Los resultados mostraron que la exposición al glufosinato en NOEC (0.01 mg L^{-1}) ocasionó un incremento del volumen celular (636.68 µm³) y vacuolización (492.19 µm³). En contraste, la exposición a la CI_{50} (0.33 mg L^{-1}) generó vacuolización más evidente, ausencia del eyespot, deformación del pirenoide, pérdida de flagelos y alteraciones en la hendidura apical.

Por su parte, el glifosato mostró un patrón diferenciado: a la CI_{50} (0.013 mg L^{-1}) se observó un incremento del biovolumen (670.20 µm³), acompañado de vacuolización, ausencia de eyespot, pérdida de flagelos, alteraciones en la hendidura apical y balonamiento con lisis celular. En cambio, la exposición a la NOEC (0.0001 mg L^{-1}) produjo una reducción del volumen celular (461.30 µm³), manteniendo la integridad de los componentes celulares, con pirenoide bien delimitado y flagelos presentes. La interacción binaria de ambos herbicidas mostró un efecto atenuado en comparación con las exposiciones individuales. Tanto en la CI_{50} como en la NOEC (0.45 mg L^{-1} y 0.02 mg L^{-1}, respectivamente), las células presentaron menor tamaño (448.30 y 461.70 µm³), pero conservaron sus componentes celulares sin alteraciones morfológicas significativas y con flagelos presentes.

Finalmente, esto evidencia que la interacción binaria mostró un efecto atenuado con posibles mecanismos de antagonismo o compensación en la respuesta celular.

INTRODUCCIÓN

Los distintos ecosistemas acuáticos del Estado de Michoacán son pieza clave desde el punto de vista del desarrollo económico tanto por la diversidad de actividades antropogénicas (pesca, riego

agrícola y agropecuario, principalmente) como por la producción de energéticos y la administración de agua potable. No obstante, actualmente se presenta un exacerbado estrés hídrico debido a la alta tasa demográfica y alimenticia. De acuerdo con lo anterior, México ocupa el lugar 53 de los países con mayores grados de presión hídrica por contaminación debido al vertido de diferentes residuos químicos de interés prioritario por ser emergentes y persistentes. Concretamente el uso de agroquímicos como herbicidas producen elevada eutrofización de lagos y aguas lénticas provocando alteraciones estructurales en las poblaciones y comunidades biológicas[1].

Además, la CONAGUA calcula que, a nivel nacional y regional, entre el 85 y 95% del agua residual proveniente de uso agrícola se descarga directamente a los ríos, lagos, costas y océanos sin recibir un tratamiento previo de neutralización. Se trata de sistemas altamente contaminados y eutrofizados con una muy significativa inestabilidad ecológica debido al uso indiscriminado de agroquímicos, fundamentalmente herbicidas procedentes de huertas de aguacate, cultivos de maíz y hortalizas[2]. Conforme a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), existen más de 500 formulaciones de herbicidas registradas en México[3].

El herbicida más utilizado en nuestro país es el glifosato (Gly), que comprende el 45% del comercio de plaguicidas a nivel nacional. Es un herbicida sistémico de amplio espectro que inhibe la 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS) enzima involucrada en la biosíntesis de los aminoácidos aromáticos esenciales como la fenilalanina, tirosina y triptófano necesarios para el crecimiento de la planta a erradicar[4]. Se aplica en un 80 % para el control de malezas en cultivos transgénicos de maíz, aguacate y soya[5]. Sin tomar en cuenta el riesgo tóxico terrestre y acuático que conlleva el uso desmedido de este herbicida categorizado como contaminante emergente (CE), el Gly ha sido objeto de controversia ya que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) lo clasificó como probable carcinógeno en el grupo 2A[6], mientras que la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) no lo hizo[7], no obstante, se ha asociado con disrupción endocrina y estrés oxidativo[8].

Por lo anterior, México determinó en una decisión unilateral “prohibir el glifosato a partir de enero de 2024”. Sin embargo, cuenta con diversos registros de diferentes formulaciones ante la COFEPRIS con vigencias hasta 2030 (Roundup®, Cacique480®)[3]. Conjuntamente, ha propuesto alternativas sintéticas de mayor toxicidad con buen control de malezas post y pre-emergentes, como lo es el glufosinato de amonio (Gla)[9,10]. El Gla o Ácido de amonio (2RS)-2-amino-4-(metilfosfinato) butírico existe en diversas formulaciones con registro ante la COFEPRIS como Rainbow®, Bélico®, entre las más utilizadas[3]. Es un herbicida foliar, químicamente un organofosforado (OF) no selectivo que inhibe la actividad de la glutamina sintasa (GS), provocando la acumulación excesiva de amoníaco en la célula vegetal con incremento del pH, desacoplamiento de la fotofosforilación oxidativa, estrés oxidativo, inhibe la fotorrespiración y reducción de la productividad bruta fotosintética[11]. Se aplica de forma postemergente en malezas de cultivos de maíz, aguacate, cítricos, trigo[9]. Sin embargo, se ha vinculado a efectos neurotóxicos y reproductivos en modelos experimentales[8].

Por lo anterior, la aplicación continua y persistente de ambos herbicidas en tratamientos pre y postemergentes en malezas resistentes de cultivos transgénicos, suponen su presencia en el ecosistema acuático a través de escorrentía y/o lixiviado, y como vertidos, la exposición a estos herbicidas sobre comunidades fitoplanctónicas, como productores primarios fotosintéticos, son la base de la cadena trófica acuática. Por lo que cualquier alteración en dichas poblaciones y comunidades fitoplanctónicas, se producen consecuencias devastadoras irreversibles en el ecosistema acuático.

Por ende, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar las modificaciones morfológicas en la microalga marina *Tetraselmis* sp. expuesta a corto plazo (72 h) al glufosinato de amonio y glifosato, así como su exposición de la interacción binaria del Gly y Gla a las concentraciones ambientalmente relevantes.

PARTE EXPERIMENTAL

Modelo biológico

La cepa CIBA 138 de *Tetraselmis* sp. (F. Stein, 1878), fue obtenida de la Colección de Microalgas del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz, B.C.S., México. La microalga se cultivó en matraces de cultivo celular con respiración (Greiner Bio-One, Longwood, NJ, EE.UU.) en 20 mL del medio de enriquecimiento Guillard F/2 (Sigma, Aldrich Chemie, Taufkirchen, Alemania) a un pH de 8.2 ± 0.2 y salinidad de 35 g L^{-1} para el crecimiento axénico de la microalga. La cepa se mantuvo a 25 ºC bajo una incidencia fotónica de 60 µmol m^{-2} s^{-1} con un ciclo de fotoperiodo luz: oscuridad de 12:12h a una longitud de onda de 400 a 700 nm. Las células se mantienen en crecimiento exponencial por medio de transferencias de inóculo unicelular a un medio fresco cada dos semanas.

Agroquímicos

Para determinar las respuestas inhibitorias de la microalga, se utilizaron dos formulaciones de los herbicidas de grado comercial: glufosinato de amonio (184 g L^{-1}, Bélico®, PetroAgro S.A. de C.V. El Salto, Jalisco, México) y una formulación líquida de glifosato (475 g L^{-1}, LAFAM®; DRAGON S.A. de C.V., La Magdalena Contreras, Ciudad de México).

Inhibición de crecimiento poblacional

La estimación de este parámetro se basó de acuerdo con la directriz (201) de la OECD [12], que consiste en el bioensayo de inhibición de crecimiento poblacional de microalgas debido a la exposición de distintas concentraciones del glufosinato de amonio a las 72h de exposición (Fase exponencial). Inicialmente, en cada tubo se incluyó una concentración de $1x10^5$ cel mL^{-1} con ajuste por recuento sobre cámara de Neubauer (Brand Gmb H + CO KG, Germany) en microscopio óptico (Zeiss, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Germany) a un volumen total de 3 mL de medio Guillard F/2.
La evaluación se realizó a partir de los índices de toxicidad: Concentración Inhibitoria al 50% de la población y la Concentración Máxima sin Respuesta Observada a las 72h de exposición ($CI_{50(72)}$ y 72h-NOEC, respectivamente) en un rango de concentraciones de 0.01 a 5.0 mg L^{-1} del GLA.
La mezcla binaria se diseñó sobre la base de los resultados de toxicidad observados de los agroquímicos en interacción del glifosato (Gly) y glufosinato (Gla) sobre la microalga ($CI_{50(72)}$ 0.01 y 0.33 mg L^{-1}, respectivamente), del valor de la 72h-NOEC (0.0002:0.01 mg L^{-1}) en interacción de ambos.

Estimación del volumen celular y morfología en Tetraselmis sp.

Se evaluaron los efectos fenotípicos en el tamaño celular a través de los modelos geométricos para el cálculo del volumen celular en fitoplancton establecidos por Hillebrand et al., 1999 y Sun & Liu, 2003[13,14]. Este método aplica el principio de 20 modelos geométricos y sus respectivas ecuaciones a partir de las dimensiones lineales para más de 850 géneros de 87 microalgas planctónicas. Se utilizó una n= 20 células por cada índice de toxicidad (CI_{50} y NOEC) tanto individual como en la interacción binaria del Gly y Gla.*Tetraselmis* sp. muestra una forma de esferoide alargada (modelo 2-H), para el cálculo de su volumen celular, se basó de acuerdo con el siguiente modelo:

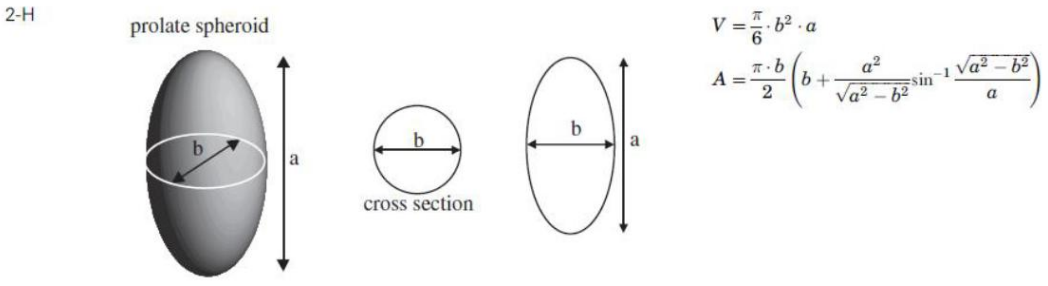


Figura 1. Modelo geométrico esférico para la determinación del volumen celular en *Tetraselmis sp.*[13,14].

La morfología celular de *Tetraselmis* sp., fue calculada a través del análisis de imagen por microscopía óptica (Zeiss, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Germany) a 100X de magnificación con aceite de inmersión (resolución de 12.06 px/µm y calibración al 100% de ajuste del zoom) por cámara incorporada AmScope Microscope Digital Camera (MU1000, FMA050, 5mm, 10MP, Color CMOS) e interpretación por el software AmScope 2023 v4.11.22328.20230326 (United Scope LLC, Irvine CA, U. S.).

Análisis estadístico

La determinación de los índices de toxicidad *Tetraselmis* sp. son expresados mostrando su media y su desviación estándar de cada valor (m ± ds). La determinación de los índices $CI_{50(72)}$ y 72h-NOEC se calcularon a través de curvas Concentración-Respuesta por regresión lineal, mostrando sus respectivos Límites de Confianza al 95%. La normalidad de los datos se evaluó por el Test de D'Agostino y Pearson, utilizando un nivel de significancia de $p < 0.05$.

La comparación múltiple de las respuestas sobre el volumen celular en *Tetraselmis* sp. se realizó a partir de t-test corrección por análisis de Welch. Las diferencias se consideran significativas a $p < 0.05$. El análisis estadístico se realizó por el software Graphpad Prism v9.5.0 (Graph-Pad Software Inc., USA).

RESULTADOS

Acorde con la exposición a la NOEC del Gla, la célula de *Tetraselmis* sp. incrementó su volumen celular de 636.68 ± 139.21 µm^3 con diferencias estadísticamente significativas $p < 0.001$ comparadas con la cepa control). Por el contrario, en la cepa expuesta al valor de la $CI_{50(72)}$ del herbicida no muestra aparente cambio en el tamaño celular (577.50 ± 136.40 µm^3) comparada con la cepa control (Fig. 2b). Conjuntamente, se muestra que la cepa expuesta a la NOEC (Fig. 3B) exhibe formación de vacuolas, mientras en CI_{50} no se visualiza la mancha ocular o Eyespot (E), el pirenoide (Py) muestra una aparente deformación (Fig. 3C), los flagelos estaban ausentes y alteraciones visibles en su hendidura apical si la comparamos con la cepa control y la expuesta a la NOEC (Fig. 2b).

Tabla 1. Volumen celular de *Tetraselmis* sp. Expuesta al Gla, Gly y a la interacción binaria de Gla:Gly. n=20

Herbicida	Cepa control	$CI_{50(72)}$ µm^3	72h-NOEC µm^3
Glufosinato de amonio (Gla)	492.19 ± 133.80	577.50 ± 136.40	636.68 ± 139.21**
Glifosato (Gly)	591.70 ± 19.64	670.20 ± 30.83*	461.30 ± 12.28***
Gla: Gly	517.6 ± 20.32	448.30 ± 19.89	461.7 ± 34.84

, *: diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.001$; $p < 0.0001$) entre el valor de la NOEC y la CI_{50} con respecto al control por t-test (corrección de Welch)

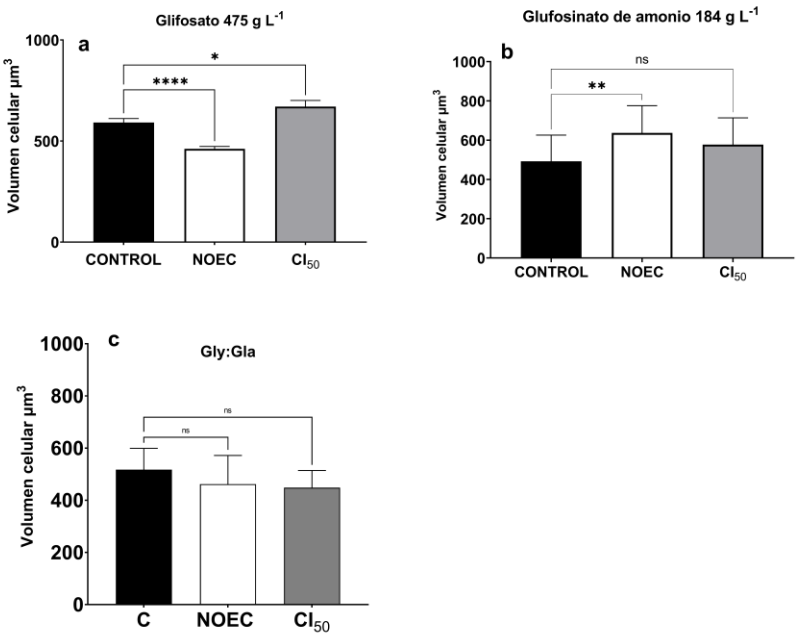


Figura 2. Volumen celular de *Tetraselmis* sp. Expuesta a: **a)** a la NOEC y CI_{50} del glifosato (Gly), **b)** NOEC y CI_{50} del glufosinato de amonio (Gla), **c)** interacción binaria Gly:Gla NOEC y CI_{50}

Con respecto a la exposición al Gly, en las células de *Tetraselmis* sp. (Tabla 1), se muestra un incremento de biovolumen de la microalga expuesta a la CI_{50} de 670.20 ± 30.83 µm^3 comparado con la cepa control. No obstante, de acuerdo con la NOEC del herbicida se reporta una reducción del tamaño celular con diferencias estadísticamente muy significativas ($p < 0.0001$) comparadas con la cepa control (Fig. 2a)

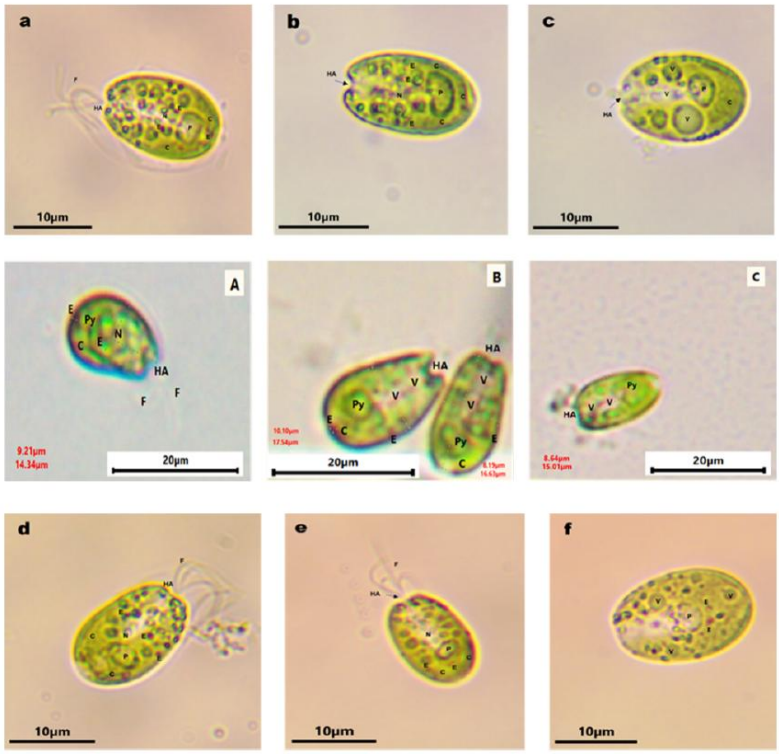


Figura 3. Morfología celular de la cepa CIBA 138 de *Tetraselmis* sp. **a)** Cepa control, **b)** Cepa expuesta al valor de la NOEC del Gly y Gla (minúsculas) y **c)** cepa expuesta al valor de la CI_{50} del Gly y Gla. **d)**NOEC Gly:Gla**, e)** CI_{50} Gly:Gla, **f) CA. C:** Cloroplasto, **E:** Eyespot, **F:** Flagelos, **HA:** Hendidura Apical, **N:** Núcleo, **P:** Pirenoide, **V:** Vacuolas.

Con respecto a las diferencias morfológicas por el Gly, claramente la célula expuesta al valor de la CI_{50} en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un marcado aumento del v olumen celular, pero además de la aparente presencia de vacuolas, flagelos ausentes, ausencia de los Eyespots en la célula, alteraciones en la Hendidura Apical (HA) y balonamiento y ruptura celular (Fig. 3c). Sin embargo, en la célula expuesta al valor de la NOEC del glifosato (Fig. 3b) se observa el mantenimiento de sus componentes celulares y un aparente incremento del contenido de clorofila y un pirenoide bien delimitado, pero hay una reducción de su superficie y volumen celular.

Sin embargo, en la interacción de los herbicidas a los valores de las CI_{50} de cada uno, las células muestran un menor tamaño celular (448.30 ± 19.89 μm^3) como se muestra en la Tabla 1, reduciendo así su superficie manteniendo todos sus componentes celulares sin una aparente alteración morfológica o cambio con sus flagelos presentes (Fig. 3e), sin diferencias estadísticas con el control ($p > 0.05$). Inclusive a la interacción de los valores de la NOEC de cada uno, los organelos y componentes celulares se encuentran bien delimitados y la presencia de sus 4 flagelos y la presencia de sus Eyespots característicos de este género (Fig. 3d).

DISCUSIÓN

Este trabajo marca el punto de partida, ya que no hay estudios previos sobre la evaluación del volumen celular y morfología de *Tetraselmis* sp. expuesta al glufosinato de amonio. Sin embargo, uno de los pocos estudios que evalúan la morfología celular por exposición al glifosato sobre la cianobacteria *Microcystis aeruginosa* y las microalgas *Ankistrodesmus falcatus, Chlorella vulgaris, Pseudokirchneriella subcapitata,* y *Scenedesmus incrassatulus*, es el realizado por Hernández-García & Martínez-Jerónimo, (2023)[15], tales autores reportan que a exposiciones equivalentes a las CI_{10}, CI_{20} y CI_{40} entre 0.2 a 3.0 mg L^{-1} de la formulación del glifosato Faena®, se muestra la pérdida de la forma e integridad típica de la pared celular y un aumento del biovolumen en todas las microalgas y la cianobacteria. Además, revelaron una reducción y desorganización del cloroplasto, incremento en gránulos de almidón y polifosfato, formación de vesículas y vacuolas, degradación del citoplasma y pérdida de continuidad de la pared celular.

CONCLUSIONES

Finalmente, la exposición al glufosinato de amonio (Gla), *Tetraselmis* sp. presentó incremento en su volumen celular, vacuolización, ausencia del Eyespot, pirenoide deformado, ausencia de flagelos y alteraciones en su hendidura apical.

Con respecto a la exposición al glifosato (Gly), la exposición al valor de CI_{50}, exhibió aumento un marcado del volumen celular, vacuolización, flagelos ausentes, ausencia de los Eyespots, alteraciones en la Hendidura Apical y balonamiento y ruptura celular. En exposición a la NOEC, se observó el mantenimiento de sus componentes celulares y reducción de su superficie y volumen celular. En la interacción binaria, mostró un efecto atenuado con posibles mecanismos de antagonismo o compensación en la respuesta celular.

BIBLIOGRAFÍA

1. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México. (2015).
2. Almanza Álvarez, J. S. *et al.* Diatomeas perifíticas del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Hidrobiológica* 26, 161–185 (2016).

3. COFEPRIS. Consulta de Registros Sanitarios de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y LMR. *Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios* http://siipris03.cofepris.gob.mx/Resoluciones/Consultas/ConWebRegPlaguicida.asp (2023).
4. Alcántara-de la Cruz, R., Cruz-Hipolito, H. E., Domínguez-Valenzuela, J. A. & De Prado, R. Glyphosate ban in Mexico: potential impacts on agriculture and weed management. *Pest Manag. Sci.* 77, 3820–3831 (2021).
5. ISAAA. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2019 - ISAAA Brief 55-2019 | ISAAA.org. https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/ (2022).
6. IARC. *IARC Monographs Hazard Classification*. https://www.iarc.who.int/infographics/iarc-monographs-classification (2023).
7. EFSA. EU Pesticides Database (v.2.2) Pesticide residue(s) and maximum residue levels (mg/kg). *EU Pesticides Database (v.2.2) Pesticide residue(s) and maximum residue levels (mg/kg)* https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/mrls/?event=details&pest_res_ids=120&product_ids=&v=1&e=search.pr (2022).
8. Cuzziol Boccioni, A. P. *et al.* Comparative assessment of individual and mixture chronic toxicity of glyphosate and glufosinate ammonium on amphibian tadpoles: A multibiomarker approach. *Chemosphere* 309, 136554 (2022).
9. SENASICA. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria | Gobierno | gob.mx. https://www.gob.mx/senasica (2023).
10. INIFAP. Presentan herbicidas alternos para el control de malezas en pre siembra. *gob.mx* http://www.gob.mx/inifap/articulos/presentan-herbicidas-alternos-para-el-control-de-malezas-en-pre-siembra (2021).
11. Plugaru, S. *et al.* Comparative study on growth and photosynthetic pigment dynamics of two microalgae under the influence of water pollution with the herbicide glufosinate. *Stud. Univ. Babeș-Bolyai Chem.* 62, 239–250 (2017).
12. OECD. *Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test | En | OECD*. en http://www.oecd.org/env/test-no-201-alga-growth-inhibition-test-9789264069923-en.htm (2011).
13. Hillebrand, H., Dürselen, C.-D., Kirschtel, D., Pollingher, U. & Zohary, T. Biovolume Calculation for Pelagic and Benthic Microalgae. *J. Phycol.* 35, 403–424 (1999).
14. Sun, J. & Liu, D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. *J. Plankton Res.* 25, 1331–1346 (2003).
15. Hernández-García, C. I. & Martínez-Jerónimo, F. Changes in the morphology and cell ultrastructure of a microalgal community exposed to a commercial glyphosate formulation and a toxigenic cyanobacterium. *Front. Microbiol.* 14, (2023).

DINÁMICA DEL PROTEOMA DURANTE LA ELABORACIÓN Y CURACIÓN DEL QUESO DE PORO

Elba Rodríguez-Hernández, Meyli Claudia Escobar Ramírez

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal-INIFAP. Colón, Querétaro, México.
rohe577@hotmail.com.

RESUMEN

El enfoque proteómico ha adquirido gran relevancia en la ciencia de los alimentos en los últimos años. En la industria láctea se han realizado numerosos análisis destinados a identificar las biomoléculas responsables de la calidad y composición de la leche y sus derivados. Estos estudios permiten una visión global e integrada de la muestra biológica, analizando la compleja mezcla de proteínas que conforman el proteoma. El queso de poro es un producto genuino muy apreciado por su sabor distintivo, cuyas condiciones de procesamiento, maduración, microbiota diversa y producción de péptidos bioactivos lo diferencian de otros quesos comerciales. Sin embargo, existen pocos estudios orientados a caracterizar los componentes proteicos que confieren estas propiedades únicas al queso de poro. Por esta razón, en este trabajo se realizó una primera aproximación al análisis de dichas biomoléculas. Se extrajeron proteínas de muestras de leche, cuajada y queso de poro (procedente de Balancán, Tabasco). Las muestras fueron desagregadas y homogeneizadas mediante sonicación, y tratadas con ácido tricloroacético (TCA). Las proteínas se separaron inicialmente por gradiente de pH mediante isoelectroenfoque (IEF) y, posteriormente, de acuerdo con su masa molecular mediante SDS-PAGE. Los mapas proteómicos obtenidos se compararon utilizando el software PDQuest, con el objetivo de analizar las diferencias entre las muestras de leche, cuajada y queso, e identificar posibles péptidos o proteínas bioactivas. Los resultados demuestran 12 spots en los extractos de proteína de leche, 17 en la cuajada y 14 en el queso. De manera relevante, se detectaron spots de aproximadamente 10 kDa, que podrían corresponder a péptidos bioactivos. En este estudio se identificaron proteínas presentes en las tres etapas del procesamiento. En la leche se encontraron moléculas diversas e intactas, debido a su condición no pasteurizada. Los spots designados como L1 y C2 podrían corresponder a cadenas pesadas de inmunoglobulinas, especialmente de IgG, cuya cadena pesada reporta un peso molecular cercano a 60 kDa y un punto isoeléctrico entre 6,4 y 8,5. Este trabajo constituye un primer acercamiento para investigar las diferencias en la cantidad y el tipo de proteínas presentes durante el procesamiento del queso de poro, y sienta las bases para una caracterización más detallada que permita, en el futuro, autentificar y valorar este producto de manera más precisa.

INTRODUCCIÓN

En México se estima que se producen cerca de 40 variedades de quesos genuinos (Villegas de Gante et al., 2014). Entre los que se encuentran el queso de poro de Balancán (QPB), producido en los municipios de Balancán, Tenosique, Jonuta y Emiliano Zapata en Tabasco. El queso de Poro, es un queso elaborado con leche cruda de vaca, prensado en los tradicionales moldes de madera y madurado por 3 o 4 días; posteriormente el queso se cubre con cera y se envuelve en celofán para su venta. El queso de poro tiene la marca colectiva denominada “Queso de Poro de Balancán, Región de Origen” que otorga el Instituto Mexicano de la propiedad industrial, con número de registro 1271541; esto representa una revalorización de productos elaborados con procedimientos tradicionales (de la Rosa-Alcaráz et al., 2015; González-Córdova et al., 2016). El aroma y sabor son las principales características que distinguen al queso de poro de Balancán. Sin embargo; esas características pueden variar considerablemente, debido a diferentes factores; como las condiciones ambientales incluyendo el clima del lugar de producción y las propiedades de la leche (De la Rosa-Alcaraz, et al 2020). La cuajada sigue un proceso a través del cual se obtiene el queso para su

consumo; en este proceso la cuajada pierde componentes entre los que se encuentran una gran cantidad de proteínas que son clave para que el queso de poro contenga la consistencia, el sabor y la calidad que lo caracteriza, además de que, a través de este proceso de maduración del queso, también se producen proteínas de alto valor biológico; sin embargo, no se conocen cuáles son las diferencias en las proteínas presentes en la leche, la cuajada y el queso de poro madurado, por lo que, es importante realizar investigación al respecto. El objetivo de este trabajo, fue comparar y analizar las diferencias en los mapas proteómicos de la leche, cuajada y queso para la elaboración de queso poro. Esta primera aproximación a investigar las diferencias en la cantidad y nivel de las proteínas presentes permitirá a futuro una mejor caracterización del queso poro para su autenticidad y a nivel nutricional.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Las muestras de leche, cuajada y queso, se tomaron de una quesería de Balancán tabasco, se congelaron a -20°C y se transportaron al laboratorio de biología molecular del CENIDFyMA-INIFAP. La cuajada y queso fueron desagregados y homogenizados mediante un sonicador ultrasonico a baja temperatura. Las muestras homogenizadas y la leche fueron sometidas a extracción de proteínas totales con ácido tricloroacético (TCA) a partir de 2 ml de leche, dos gramos de cuajada y queso y 20 ml de PBS 1 X, posteriormente se homogenizó la solución por 30 minutos y se continuó con el protocolo de extracción. Las proteínas fueron separadas por gradiente de pH; a traves de isoelectroenfoque (IEF) y posteriormente, la separacion se realizó de acuerdo a su masa molecular mediante una SDS-PAGE. La electroforesis bidimencional se realizó mediante el paquete comercial 2-D Starter Kit (BIO-RAD, Cat. 163-2105, USA) y la técnica se llevo a cabo de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Los mapas proteómicos obtenidos, fueron comparados en el programa PDQuest (PDQuest Advanced 2D Analysis Software, No. Cat. 170-9630. BIO-RAD, USA). Los spots (proteínas) se detectaron al sobreponer las imágenes de los geles con el gel maestro previamente obtenido. A la imagen cruda del gel maestro se le restó fondo y filtró, para obtener la intensidad en pixeles de las manchas seleccionadas para todos los tratamientos evaluados.

RESULTADOS

La caracterización de las muestras de leche, cuajada y queso se evaluó a través de los geles bidimensionales, cuyas imágenes se presentan en la figura 1. Como resultado, se obtuvieron los spots presentes en los geles de cada muestra láctea.

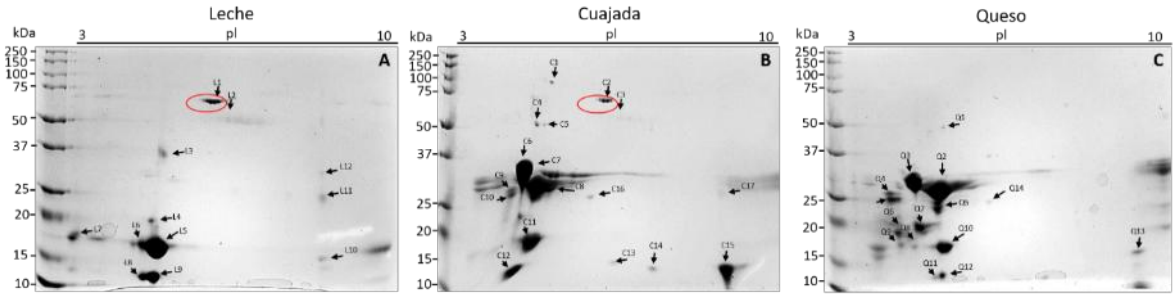


Figura 1. Electroforesis bidimensional de extractos de proteína de leche, cuajada y queso de poro. 1A) Patrón electroforético de proteínas de leche, 1B) Patrón electroforético de proteínas de cuajada, 1C) Patrón electroforético de proteínas de queso de poro. Geles al 12% y rango de pH de las tiras de 3-10.

En el análisis se determinó el número de spots presente en cada muestra de proteínas, y se compararon los spots encontrados en cada una. El análisis de los geles reveló la presencia de 12 spots en el extracto de proteínas de leche (los spots que no se logran evidenciar de manera clara o con baja intensidad no fueron tomados en cuenta). Es de resaltar que el spot marcado con el código

L1 no es un solo spot, en esa posición aparentemente se encuentran cuatro spots que no se logran evidenciar de manera individual, al menos en la muestra de leche, lo que sí es evidente, es la masa molecular que presentan; la cual, se encuentra cercana a los 60 kDa y un pl en el rango de 6 a 6.8; cabe mencionar que este agrupamiento de spots se observó también en la muestra de cuajada, pero no, en la muestra de queso. Para el extracto de proteínas de cuajada se identificaron 17 spots bien enfocados (Figura 1B); de los cuales, tanto el spot L1 como el C2, fueron registrados como el mismo conjunto de spots, como se mencionó anteriormente; en el spot de código L1 no se logra diferenciar la cantidad de spots presentes de manera clara, esto podría ser porque, en el conjunto de spot L1 existe una mayor abundancia relativa de proteínas y no se logró el enfoque de forma precisa. En el gel con extractos de proteínas de queso, se observan 14 spots; interesantemente, el conjunto de spots que se observan en L1 y C2 no se encuentran en el gel de muestra de queso, esto podría deberse a la baja abundancia relativa de las proteínas o a la ausencia de esas proteínas en la muestra. De manera general podemos resaltar que, en los tres geles, se observan mayor número de proteínas en un rango de masa molecular de entre 10 a 75 kDa y un pl de entre 3 a 6. Esto indica que se encontraron proteínas predominantemente ácidas y algunas pocas neutras. Algunos de los spots, se pueden observar en los tres geles como es el caso de los spots L10, C15 Y Q13. Estos tres spots aparentan ser la misma proteína con un peso aproximado a 15 kDa y un pl aparente de 8.8 y con mayor abundancia relativa en la muestra de cuajada con respecto a muestras de leche y queso. Los spots con los códigos L8, C12 Y Q11 aparentan ser la misma proteína con pl aproximado de entre 4.5 a 5, y una masa molecular aproximada de 12 kDa.

DISCUSIÓN

Los estudios proteómicos revelan péptidos que podrían representar marcadores moleculares o genéticos para la investigación del control de calidad y caracterización regional de los quesos de poro. En este trabajo, determinamos las proteínas encontradas en leche, cuajada y queso de poro; se observaron 12 spots en el extracto de proteínas de leche; en la leche se encuentran moléculas variadas e integras debido a su condición no pasteurizada. Los spots representados por L1 y C2 podrían corresponder a cadenas pesadas de algunas inmunoglubilinas, sobre todo de la IgG que esta reportada la cadena pesada, con un peso molecular aproximado de 60 kDa y un punto isoeléctrico que va de 6,4 a 8,5. En la cuajada se encontraron 17 spots, en particular podemos diferenciar tres spots: El spot C12 que podría corresponder a la α-lactoalbúmina que reporta un peso molecular cercano a 14 kDa y un pl entre 4,2 y 4,8; el spot C13 que muestra valores similares a la β-lactoglobulina (18.4 kDa pH 4,7 - 5,2) y el spot C18 que podría corresponder a la caseína, ya que exhibe un peso molecular aproximado a 25 kDa y una pl de 4.7. En el queso se observaron 14 spots; en el queso de poro después de 7 días se presentan bandas que no se presentan en la cuajada; esto podría deberse a que las bacterias acido lácticas hidrolizaron algunas proteínas. Esto concuerda con reportes donde se ha demostrado que después de varios meses de maduración, se observa una extensa hidrólisis de caseínas (Zhao et al., 2019). En el gel de la leche los spots L8 y L9 presentan una mayor intensidad comparado con los spots Q11 y Q12 correspondientes al gel del queso, esto indica una posible hidrólisis de las bacterias; sin embargo, es necesario realizar ensayos adicionales para verificar esto; utilizando algún método para caracterizar la proteólisis en leche y queso, como es el caso de la espectrometría de masas. En general podemos destacar que en los tres geles se observa mayor número de spots en un rango de masa molecular de entre 10 a 75 kDa y pl de entre 3 a 6. Esto indica que se encontraron proteínas predominantemente ácidas y algunas pocas neutras. Algunos de los spots se pueden observar presentes en los tres geles/ en las diferentes muestras; como es el caso de los spots L10, C15 Y Q13. Estos tres spots aparentan ser la misma proteína con un peso aproximado a 15 kDa y un pl aparente de 8.8 y con mayor abundancia relativa en la muestra de cuajada con respecto a muestras de leche y queso. Los resultados aquí obtenidos nos permitirán a futuro, realizar una caracterización más precisa de las proteínas que se encuentran involucradas en el proceso de maduración y calidad del queso artesanal de poro. Durante la realización de este trabajo, nos enfrentamos a algunas limitaciones técnicas que a futuro podremos atender para diseñar puntualmente el protocolo experimental; como es el caso del rango de pH, en ensayos futuros deberemos utilizar un rango de pH de 4 a 7 para separar de manera óptima las proteínas y lograr un mayor enfoque. La concentración de proteína; usar una concentración suficiente que asegure la visualización de proteínas de baja intensidad. Un hecho importante en este trabajo, es que;

advertimos la presencia de péptidos de baja masa molecular, nuestra perspectiva es, identificar a través de geles tris-tricina y espectrometría de masa los posibles péptidos antimicrobianos, y poder caracterizar sus propiedades en el queso de poro.

CONCLUSIONES

Este trabajo es una primera aproximación, del análisis y caracterización del patrón proteico de las muestras de leche, cuajada y queso de poro artesanal; el análisis reveló 12 spots en extractos de proteínas de leche; 17 spots en la cuajada y 14 spots en los extractos de queso. Sin embargo; durante este trabajo advertimos varias áreas de oportunidad a atender; lo que nos permitirá a futuro, diseñar una mejor estrategia de estudio; como es el caso de la separación de proteínas, utilizando un rango de pH de 4 a 7; para separar de manera óptima las proteínas y lograr un mayor enfoque. Así como; la utilización de geles tris-tricina para separar péptidos pequeños; con el interés de investigar péptidos antimicrobianos en queso de poro artesanal.

BIBLIOGRAFÍA

1. Villegas de Gante, A.F. Cervantes-Escoto, A. Cesín-Vargas, A. Espinoza-Ortega, A. Hernández-Montes, A. Santos-Moreno, and Martínez-Campos A.R. (2014). Atlas de los Quesos Mexicanos Genuinos. Ed. Biblioteca Básica de Agricultura, Texcoco, Estado de México.
2. González-Córdova, A.F. Yescas, C. Ortiz-Estrada, A.M. De la Rosa-Alcaraz, M.A. Hernández-Mendoza, A. Vallejo-Cordoba, B. (2016). Invited review: Artisanal Mexican cheeses. Int. J. Dairy Sci. 99: 3250–3262.
3. De la Rosa-Alcaráz, M. A. Hernandez-Mendoza, A. Vallejo-Cordoba B. and González-Córdova A. F. (2015). Diversity and evolution of the microbial populations during manufacture of Poro de Balancán, a Mexican artisanal cheese. FIL-IDF World Dairy Summit 2015, Vilnius, Lithuania. International Dairy Federation.
4. De la Rosa-Alcaraz, M.L. Ortiz-Estrada, A. M. Heredia-Castro, P.Y. Hernández-Mendoza, A Reyes-Díaz, R. Vallejo-Cordoba, B. González-Córdova, A. F. (2020). Poro de Tabasco cheese: Chemical composition and microbiological quality during its artisanal manufacturing process. J Dairy Sci. 103(4):3025-3037.
5. Zhao, X. Zheng, Z. Zhang, J. Sarwar, A. Aziz, T. Yang, Z. (2019). Change of Proteolysis and Sensory Profile during Ripening of Cheddar-style Cheese as Influenced by a Microbial Rennet from Rice Wine. Food Sci. Nutr. 7(4):1540–1550.

EFECTO DE BEBIDA CON EDULCORANTE EN LA IMPLANTACIÓN EMBRIONARIA DEL HAMSTER

Demetrio Alonso Ambriz García, Juan Manuel Quezadas Fuentes,
José Roberto Vázquez Avendaño, Alfredo Trejo Córdova, María del Carmen Navarro Maldonado.

Departamento de Biología de la Reproducción. División de Ciencias Biológicas y de la Salud.
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.
deme@xanum.uam.mx

RESUMEN

México ocupa el primer lugar mundial en consumo de bebidas gaseosas o refrescos. El uso de edulcorantes, en vez de alta fructosa o glucosa, pareciera convencer a los consumidores, puesto que en la etiqueta nutrimental se declara “cero azúcar” o “cero calorías”. sin embargo, los edulcorantes pueden generar aumento de peso, además de afectar procesos reproductivos. Con el objetivo de probar el efecto agudo de una bebida comercial (Manzanita, Best Choice®) conteniendo acesulfame potásico/sucralosa, se les administró a hámsteres Sirios dorados y se determinó su efecto en ganancia de peso y en los sitios de implantación embrionaria. Se trataron dos grupos de 3 hembras adultas. A uno se le administró Manzanita durante 7 días (M), luego se aparearon y se continuó el suministro de bebida por otros 7 días hasta sacrifico. El grupo control solo recibió agua (A). Se dieron Nutricubos de roedor Abene® a libertad. Los resultados mostraron que el consumo de nutricubos en M fue de 6.87g/individuo/día vs 7.3g en A. En tanto que consumo de líquido fue 18.6ml vs 13.6ml, respectivamente. La ganancia de peso de inicio a apareamiento fue de 2g vs 0.8g, respectivamente ($p=0.24$), y a sacrificio 16.2g vs 11.6g, respectivamente ($p=0.06$). Los sitios de implantación embrionaria fueron 14.3±2.1 vs 17.0±2.6, respectivamente ($p=0.09$). El peso uterino fue 1.3±0.3g vs 1.3±0.1g respectivamente ($p=0.37$). El aumento de peso fue mayor en el grupo que consumió Manzanita pese a que se redujo el consumo de nutricubos. Finalmente se redujo el número de los sitios de implantación en el grupo con Manzanita aunque no hubo diferencia significativa. Se concluye que el consumo de bebida con acesulfame/sucralosa aumenta la ganancia de peso y tiene efectos negativos en la implantación embrionaria en el hámster.

TEORIA

Los edulcorantes son substancias químicas que tienen la particularidad de conferir sabor dulce a los alimentos y bebidas sin la inclusión de sacarosa (Manzur-Jattin, F. et al., 2020; Sánchez, M et al., 2021; Salas-Huetos et al., 2026) (Fig 1). Se clasifican en naturales y artificiales, dependiendo su origen, además hay algunos con aporte calórico y otros no. La stevia es uno edulcorante natural y acalórico, así como la taumatina y la brazzeína, que no tienen índice glucémico. Todos ellos tienen una capacidad de endulzar superior a la sacarosa. Dentro de los artificiales acalóricos y sin índice glucémico están el aspartamo, la sucralosa, la sacarina, el neotamo, el acesulfamo K, el ciclamato, la nehosperidina DC, el alitamo y el advantamo (Manzur-Jattin, F. et al., 2020). La sacarina es el primer edulcorante artificial descubierto por azar con un dulzor 300 veces superior al de la sacarosa, tienen estructura molecular de sulfamida con un hidrógeno ligeramente ácido por lo que forma ácidos con facilidad. La sucralosa es una modificación mediante halogenación selectiva, es acalórica y tiene 600 veces mas dulzor que la sacarosa. Es muy soluble en agua y con pobre absorción gastrointestinal (Alonso, J. 2010; Manzur-Jattin, F. et al., 2020). El acesulfamo de potasio proviene del ácido acetoacético, con dulzor de 160 a 220 veces mayor a la sacarosa y poco soluble en agua. No se metaboliza en el organismo por lo cual se excreta tal como ingresó.

Existen cambios metabólicos importantes en los consumidores a bebidas con edulcorantes, dado que se pensó inicialmente que su poder acalórico disminuirían los problemas ocasionados por la sacarosa como la obesidad, diabetes tipo II y el síndrome metabólico, sin embargo, se conoce que si alteran el metabolismo energético (Alonso, J. 2010).

En los últimos 40 años la industria alimentaria ha tenido gran expansión en especial con alimentos procesados y la consecuencia de cambios en el aumento de peso de la población, síndrome metabólico y obesidad, ha hecho que la industria ahora ofrezca alimentos y bebidas con sabor dulce, pero sin energéticos, o supuestamente sin ellos, sin embargo, resulta esencial clarificar las posiciones de eficacia y seguridad de estas sustancias en la salud de los consumidores. Actualmente no existen datos concluyentes sobre el efecto de los edulcorantes sobre la ingesta energética, el apetito y su relación con el sabor dulce y por si fuera poco, no se conocen con precisión las cantidades de los edulcorantes contenidas en alimentos y bebidas comerciales (García-Almeida J. et al., 2013). En EUA más de 6,000 productos alimentarios contienen edulcorantes, principalmente son bebidas refrescantes, aunque no existe claridad en las concentraciones, combinaciones y el tipo que contienen.

Los edulcorantes por se moléculas complejas y diversas que tienen efectos en diversos en procesos fisiológicos aún por conocer, por ejemplo, en la absorción, excreción, en metabolitos intermedios, reacción alérgica, efectos acumulativos, efectos sobre la flora intestinal, alteración de regulación de glicemia e incluso interacción con otras drogas o fármacos (García-Almeida J. et al., 2013).

A pesar de la controversia en relación al consumo de los edulcorantes, ésta se ha orientado preferentemente al consumo de los edulcorantes naturales acalóricos, tales como la stevia, sin embargo, aún quedan por estudiar a detalle sus efectos del consumo largoplacismo (Alonso J., 2010) Es conveniente recordad que el endulzante más antiguo utilizado por la humanidad, es la sacarosa o azúcar común, la cual está conformada por un disacárido (alfa-glucosa y beta-fructosa). Se la extrae de la caña de azúcar, planta cultivada desde hace 3,000 años y refinada a partir del siglo XVI (Alonso J., 2010).

El primer endulzante químico de distribución masiva es la sacarina, la cual fue purificada en 1878 a partir del ácido antranílico, siendo popular su uso en la primera guerra mundial (1914-1918), dada la difícil disponibilidad de conseguir azúcar.

Los edulcorantes representan también en la actualidad un problema político y biotecnológico de relevancia, dado que la mayoría de los edulcorantes naturales, obtenidos a partir de plantas especialmente en países en desarrollo en América y África, han sido ya obtenidas sus secuencias genéticas y son actualmente producidos a partir de transferir los genes en bacterias y de manera masiva en biorreactores, desde luego, esto último en la industria de países desarrollados, sin que los países de origen del conocimiento así como del uso de dichas plantas obtengan beneficios. (Alonso J., 2010).

Algunos edulcorantes han sido estudiados a nivel reproductivo y cuando éstos atraviesan membrana placentaria y se acumulan en el feto, se ha recomendado no consumirlos durante la preconcepción o en gestación, tal es el caso de sacarina, ciclamato, sin embargo, dependerá de la dosis consumida así como la combinación de otros alimentos (Cavagnari B., 2019). Otros edulcorantes que no han sido considerado con esta alera se desconoce su efecto con la combinación de otros alimentos, o su efecto a través de mecanismos como afectación de factores alérgicos o de la microbiota.

Finalmente, comentar que los edulcorantes de uso masivo, como los es la sacarina, o de los que no se metabolizan en el cuerpo como el acesulfame K, se han encontrado en cantidades importantes en cuerpos de agua en concentraciones importantes, siendo hoy estudiados como de relevancia en la contaminación con efectos deletéreos y otros desconocidos, para organismos acuáticos y para cadenas tróficas relacionadas (Sánchez M. et al., 2021). Colín K, en 2024, estudio el efecto de las concentraciones de edulcorantes en aguas residuales, luego de haber pasado por la planta de tratamiento, y utilizando el modelo del pez cebra expuestos a un efectyo agudo en medio consucralosa y acesulfame K, reportando efectos morfológicos importantes en las crías. Las principales malformaciones fueron la escoliosis, el edema pericárdico, deformidad de la cola, deformaciones craneofaciales, ausencia de ojos, falta de aletas e hipopigmentación. Además, la sucralosa generó estrés oxidativo caracterizada por aumento en los niveles de peroxidación lipídica,

hidroperóxidos y proteínas carbonilo. Además, aumento significativo en la expresión de genes de la defensa antioxidante (Nrf1 y Nrf2) y de los genes relacionados con la apoptosis (CASP3 y CASP9). En animales que una vez expuestos llegaron a adultos, fue de llamar la atención el aumento en la ansiedad.



Fig 1 Bebida utilizada en este experimento, con acesulfame potásico/sucralosa

METODOS

Animales. Se utilizaron 6 hembras hámster adultos de 6 meses de edad y peso promedio de 152 gr. Se colocaron 3 animales por cada caja de acrílico de las siguientes dimensiones: 20cmx 35cm x 20 cm, tapada con una rejilla metálica para sostener el alimento y el bebedero de vidrio. Se colocó 4 cm de cama sanitaria de viruta esterilizada y se cambió cada 4 días. Además se contó con 3 machos en cajas individuales de las dimensiones referidas, adultos de 8 meses de edad y peso promedio de 120 gr., con fertilidad y experiencia sexual comprobada para los apareamientos (Fig 2).



Fig 2 Apareamiento de hámster en la tarde del proestro.

Tratamientos: Se dio de manera continua durante 7 días a un grupo de hembras (experimental) en su bebedero bebida con edulcorante de manzana (Best Choice® conteniendo acesulfame potásico/sucralosa, grupo M), en tanto que el grupo control recibió solo agua (A). Los machos solo recibieron agua. Cada día fueron medidos y registrados los volúmenes consumidos con una probeta graduada. El alimento (nutricubos Abene®, roedor), fue colocado sobre la tapa de las cajas, previamente registrado el peso en una báscula. A los 7 días las hembras en estado de proestro fueron colocados en las cajas de los machos para su apareamiento durante 15 minutos y posteriormente devueltas a sus cajas. Comprobando la presencia de espermatozoides a través de una impronta con portaobjetos del orificio vaginal y visto al microscopio a 10X. Se siguió dando la bebida referida en cada grupo de hembras por otros 7 días. Las hembras fueron sacrificadas por dislocación cervical. Se obtuvieron sus aparatos reproductores. Se limpiaron de sangre y detritos, se

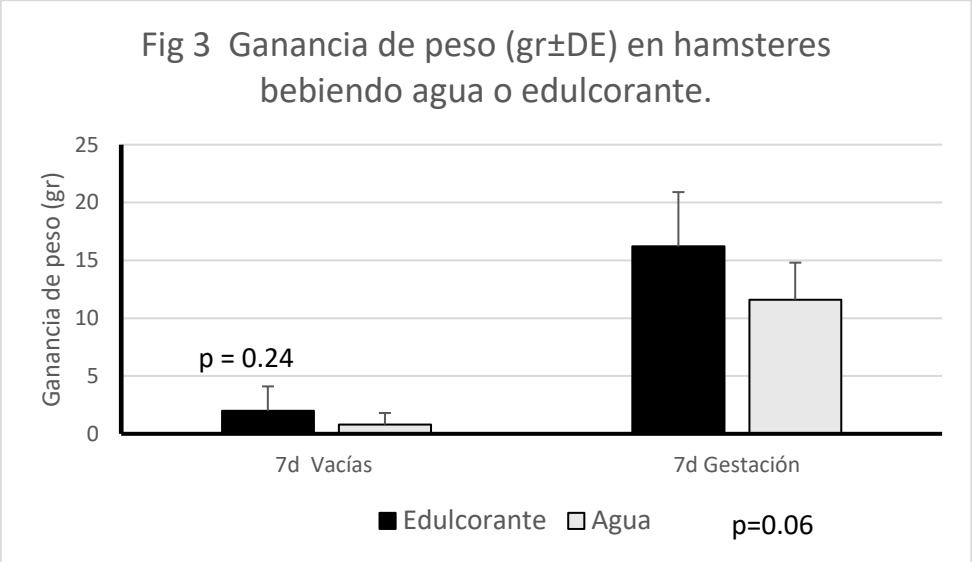
colocaron sobre una caja Petri para contar los sitios de implantación de ambos úteros. Se pesaron en una báscula (Ohaus, 0.001 a 200g).

Análisis estadísticos. Los volúmenes consumidos de bebida o agua, el alimento consumido, así como el número de los sitios de implantación fueron comparados a través de pruebas t-Student con una significancia de 0.05

RESULTADO

La bebida de manzana con edulcorante fue de inmediato aceptada por las hembras hámster, y no mostraron variación en el análisis visual de sus heces (color y consistencia) con respecto al grupo control. Por su parte el consumo de nutricubos fue menor en el grupo M (6.87g/individuo/día) vs el grupo A (7.3g), a pesar de ello y como se mostrará a continuación el aumento de peso fue mayor en el grupo M. El consumo de líquido fue 18.6ml vs 13.6ml, respectivamente.

Con respecto a la ganancia de peso, se observó que durante los 7 días previos al apareamiento éste fue escaso, sin embargo, como puede verse en la figura 3 en el grupo M fue un poco más del doble que en el grupo A (2g vs 0.8g, respectivamente, p=0.24). Durante los 7 días posteriores al apareamiento (gestación) fue evidente que el grupo M tuvo mayor ganancia de peso que el grupo A (16.2g vs 11.6g, respectivamente p=0.06). En ambos casos no se alcanzaron diferencias estadísticamente significativas, probablemente por el reducido número de animales que se utilizaron, sin embargo, en las diferencias de ganancias de peso en el grupo M es evidente la tendencia de dicha diferencia.



La identificación de los sitos de implantación en los úteros (izquierdo y derecho) es accesible macroscópicamente (Fig 4). El peso de los uteros fue similar entre grupos 1.3±0.3g vs 1.3±0.1g respectivamente (p=0.37).

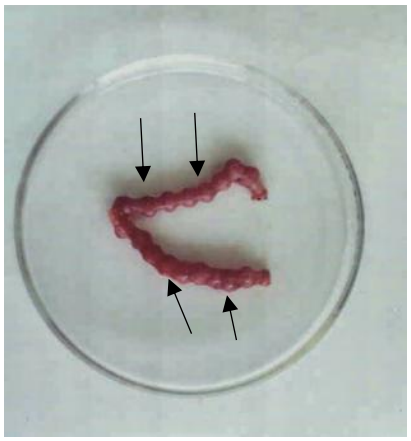
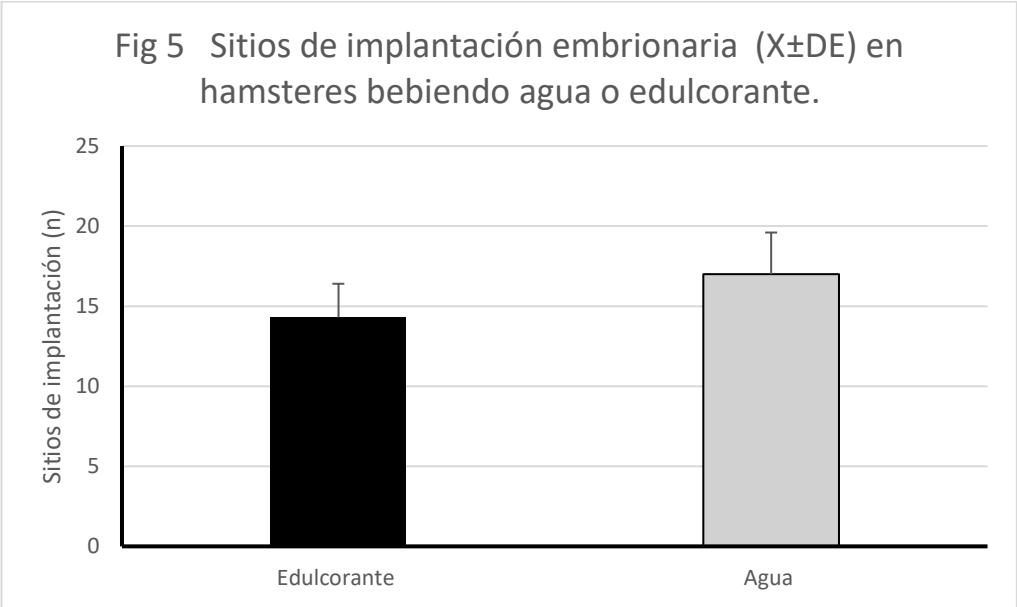


Fig 4. Sitios de implantación embrionaria en los úteros

En la figura 5, se presentan el número de los sitios de implantación embrionaria encontrados a los 7 días de gestación en ambos úteros de los grupos estudiados. Se evidencia que los sitios de implantación embrionaria fueron 14.3±2.1 (media±DE) para el grupo M vs 17.0±2.6 para el grupo A (p=0.09) con tendencia a disminuir estos sitios de implantación conforme el consumo del edulcorante, mostrando afectación en la eficiencia reproductiva. En tanto que el peso uterino fue similar entre grupos con 1.3±0.3g vs 1.3±0.1g, respectivamente (p=0.37).



DISCUSIÓN

El consumo de edulcorantes ha aumentado considerablemente en los últimos años y se prevé

que éste continue al alza, considerando que los problemas de salud en lo que respecta a la obesidad, diabetes tipo II, síndrome metabólico y aumento de peso siguen siendo prioridad en la salud pública. Los edulcorantes pueden ayudar, sin embargo, requieren de mayores estudios por sus efectos colaterales y deletéreos. Asimismo, se requiere que la industria reporte las cantidades precisas que sus productos alimenticios contienen y que el consumidor sea consciente de no rebasar los límites recomendados, así como tener el cuidado de la combinación de otros alimentos.

Varios efectos negativos se han señalado, en la literatura especializada, de los edulcorantes naturales o artificiales, algunos ya han sido reportados en la reproducción. Cabe señalar que los modelos animales de estudios (preferentemente murinos) han aportado importante información, pero debe considerarse que la alimentación humana es mucho mas compleja que esos modelos experimentales donde las variables de control son bien definidas. Por ejemplo, Souza, et al., en 2018 encontraron en humanos que el consumo de dos o tres tazas por día de café endulzado con edulcorante o alguna otra bebida conteniendo edulcorante, ocasionó en varias mujeres problemas de fertilidad. Al continuar los estudios en clínicas especializadas de reproducción, se encontró que había anormalidad fisiológica en los ovocitos, así como en los embriones obtenidos por una técnica de reproducción asistida denominada ICSI (Inyección intracitoplásmica del espermatozoide), mostrando disminución del desarrollo embrionario hacia los días 2 y 3, así como una disminución y alternación en los blastocistos, disminución de la implantación y en el porcentaje de preñez. Además, se encontró que las consumidoras habituales de productos conteniendo edulcorantes, están relacionadas con algunos problemas de fertilidad. Importa decir que todo esto es analizado en la población que asiste a las clínicas de fertilidad, no en población abierta. Además, estos datos pueden ser aún controversiales como el caso reportado por Salas-Huetos, A. et al., que en el 2026, no encontraron una relación entre el consumo de bebidas azucaradas (naturales o artificiales) con los porcentajes obtenidos de fertilidad luego de inseminación intra uterina en mujeres evidenciando lo controversial del tema pero además la complejidad en la dieta de los humanos y los múltiples efectos posibles al combinar los edulcorantes con las dosis consumidas y otros alimentos ingeridos.

Cabe señalar que en la industria al sustituir la sacarosa con algún edulcorante en la preparación de alimentos comerciales, no solo se reduce el aporte calórico, sino que, para mantener las condiciones organolépticas del alimento, la industria añade otras moléculas en sustitución, como por ejemplo grasas, que le confieren finalmente mayor aporte calórico al alimento (García-Almeida J. et al., 2013). Existen datos suficientes en investigaciones con humanos, para determinar que el consumo de edulcorantes genera aumento de peso, dado que, al desasociar el dulzor con el contenido energético, hace que se tienda a consumir mas alimento por verse influenciado el sentido del apetito (García-Almeida J. et al., 2013). Así también se ha verificado que interfiere en el mecanismo de la secreción de la insulina y en el metabolismo energético global. En el presente estudio se evidenció que las hembras hámster del grupo M, aumentaron mas de peso que el grupo A, a pesar de que consumo de alimento fue menor.

Por otro parte, el consumo de edulcorantes reduce el efecto termogénico cerebral que se produce luego del consumo de sacarosa, el cual prepara al intestino para una mejor digestión (García-Almeida J. et al., 2013). Los edulcorantes reaccionan con los receptores al sabor dulce (familia T1R y α-gustducina), mediando cambios en respuesta de hormonas y péptidos como el glucagón en las células L del intestino, por lo que en el consumo de dietas con edulcorante simultáneos a azucares podría favorecer la absorción más rápida de éstos, impactando los niveles de insulina, afectando el peso, apetito y glicemia (García-Almeida J. et al., 2013). Evidenciando que el mecanismo es complejo y no reducido a que son “acalóricos”.

Si bien se ha determinado que los edulcorantes son seguros para su consumo por la población, su interacción, metabolismo, dosis es aún difícil de comprender (García-Almeida J. et al., 2013; Colín, 2024). Se conoce que varios de los edulcorantes, entre ellos los utilizados en el presente estudios, atraviesan la barrera placentaria y se acumulan en el feto (Souza A. et al., 2018), generando algunos cambios parcialmente conocidos, en este caso encontramos no existió diferencia del peso de los úteros en el grupo M y el grupo A, pero si disminuyó la cantidad de sitios de implantación embrionaria en el útero en las hembras que consumieron el edulcorante.

CONCLUSIÓN

A través de este estudio se demostró que el consumo de una bebida comercial con edulcorante (acesulfame potásico/sucralosa) provocó un aumento del peso corporal en las hembras hámster, así como una disminución en los sitios de implantación embrionaria uterina, evidenciando su efecto

negativo en la reproducción, por lo que se sugiere tener el cuidado al consumirlas de no rebasar los dosis recomendadas, así como estar atentos con la combinación de otros alimentos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Souza, D. Paes de Almeida, G. Halpern, R. Figueira, A. Iaconelli, E. Borges. “Is there an association between artificial sweetener consumption and assisted reproduction outcomes?” Reprod Biomed Online Feb Vol 36,2, 2018, pp. 145-153. doi: 10.1016/j.rbmo.2017.11.004
2. J. García-Almeida, G. Casado, J. García. “Una visión global y actual de los edulcorantes, Aspectos de regulación” Nutr Hosp Vol 28, Supl. 4, 2018, pp.17-31
3. J. R. Alonso, “Edulcorantes naturales”. La Granja Vol 12,2, 2010, pp, 3-12. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
4. Brian M. Cavagnaria. “Edulcorantes no calóricos: características específicas y evaluación de su seguridad Arch Argent Pediatr Vol 117,1, 2019, pp, 1-7.
5. M. Sánchez, L. Gómez-Oliván, H. Islas-Flores, M. Galar-Martínez. “Destino, ocurrencia y efectos tóxicos de edulcorantes artificiales, un nuevo tipo de contaminantes emergentes” En: Contribuciones selectas en toxicología y química ambiental. Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental. 2021, pp 118-150. México.
6. K. Colín. *“*Efectos tóxicos inducidos por concentraciones ambientalmente relevantes de sucralosa, acesulfame- k y sus mezclas en *Danio rerio”.* Tesis UAEM, Licenciatura, 2024, 106pp EDOMEX.
7. Salas-Huetos, M. Mitsunami, M. Kazemi, E. Ortiz-Panozo, L. Mínguez-Alarcón , I. Souter, J. Chavarro. Maternal Intake of Sugar- and Artificially Sweetened Beverages and Outcomes of Assisted Reproduction: A Prospective Cohort Study. An International Journal of Obstetrics & Gynaecology Jan Vol 133,2, 2026, pp.302-310. doi: 10.1111/1471-0528.18360.

EFECTO DEL ELECTROMAGNETISMO SOBRE EL DESARROLLO DE CEMPASUCHIL (*Taguedes Erecta)*

Demetrio Ambriz García, Paulino Cabral Gurrola, Juan Manuel Quezadas Flores, Roberto Vázquez Avendaño, Alfredo Trejo Córdova.

División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad
deme@xanum.uam.mx

RESUMEN

Los huertos urbanos han tenido gran relevancia en los últimos años, el gobierno de la Ciudad de México y en especial la alcaldía Iztapalapa, han impulsado este modelo de agricultura urbana con diversos formatos en sitios públicos y particulares. Algunos huertos se encuentran ubicados debajo del paso de cables de alta tensión que generan electromagnetismo con algunos efectos para las plantas. Con la finalidad de conocer si existe algún efecto en el desarrollo del cempasúchil, establecimos dos plantaciones a 2km de distancia una de la otra: la primera en el Huerto Paulino (HP) en la alcaldía Iztapalapa con efecto de electromagnetismo, y otro alejado de cables de alta tensión (Huerto Salón Oliva, HSO). La germinación de la semilla se llevó a cabo en el HSO y cuando las plantas tuvieron 30 días, se hicieron los trasplantes con el sustrato y cuidados convencional de cada lugar. Al estar las plantas en franca floración se registró, en 20 plantas, la altura, diámetro y peso del tallo, el número de ramas, el peso de la raíz, el número y peso de flores y el número y peso de botones. Los resultados mostraron que la floración del cempasúchil en el HP tardó 2 meses más que en el HSO (1 de enero de 2026 vs 1 de noviembre de 2025). Hubo diferencias significativas ($p<0.05$), entre HSO y HP en las siguientes variables: altura (99.0cm±9.9 vs 162.5cm±23.9) diámetro del tallo (0.8cm±0.15 vs 1.4cm±0.4), peso del tallo (79.7g± 33.7 vs 428g± 304), peso de raíz (13.0g± 7 vs 24.5g± 16), peso de flores (44.6g±23.3 vs 50.5g± 46.1), número de ramas (18.3± 4.54 vs 43.1± 14.4) y número de botones (3.0± 0.2 vs 13.4± 10.9), También se observó que no hubo diferencia ($p>0.05$) en el número de flores (13.4± 5.44 vs 15.7± 10.8, respectivamente). Se concluye que el electromagnetismo tiene efectos en el cultivo de cempasúchil generando mayor crecimiento en la planta y retrasando el tiempo de la floración, cambiando con ello, el tiempo de cosecha.

INTRODUCCIÓN

En México, en muchas de sus poblaciones, se tiene un particular respeto por las personas fallecidas y se les brinda un reconocimiento u homenaje diverso según las tradiciones prehispánicas. Muchas de éstas incluyen el poner una “ofrenda” que equivale a ofrecer a los difuntos, comida y bebida que en vida acostumbraban a disfrutar. Se coloca además un vaso con agua, a veces bebidas alcohólicas, pero un elemento imprescindible es la planta (con flor) de cempasúchil (ver fig 1) (Torres, F, 2025).



Fig 1. La planta (con flor) de cempasúchit tiene un profundo significado místico en nuestro paÍs.

Es importante comentar que esta planta posee flores de color amarillo-anaranjado muy vistosas que los antiguos pueblos prehispánicos, reconocían como “soles” que daban la luz necesaria a los difuntos para guiarlos a su llegada a la casa de sus familias quienes, esperándolos, les ofrendaban esos alimentos y compañía así como que servía también ese “sol” para guiarlos desde el panteón o la calle de acceso (Torres, F, 2025). Esto ha representado un mercado muy importante para los días 1 y 2 de noviembre o “días de muertos” (el día 1, de todos los santos y el 2, de los fieles difuntos, según la iglesia católica) o como maneja la tradición (día 1, de los muertos niños-jóvenes, día 2, de los muertos adultos). Es importante señalar que, para obtener la floración en una fecha deseada, implica un conocimiento del crecimiento y maduración de la planta, así como precisar la fecha de siembra y cuidados del cultivo. Es relevante mencionar que este cultivo tiene cotización especial en el tiempo indicado por lo que los procesos que competen al agricultor deben hacerse puntualmente en tiempo y forma, sin menoscabo de las condiciones climáticas o ambientales que pueden hacer que se reduzca la eficiencia del cultivo (fig 2).

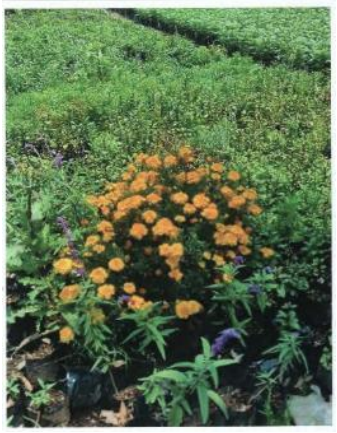


Fig 2 Se debe precisar el tiempo de siembre, crecimiento y floración para el día requerido.

Existe otro mercado relevante para el cempasúchil, fuera de la temporada señalada, de los pétalos se pueden obtener pigmentos (carotenos), en particular astaxantina y zeaxantina, que se utilizan en la industria alimentaria y como aditivo en la producción avícola (para la pigmentación de la yema del huevo y del tejido subcutáneo en la piel del pollo de engorda (López y García,2026). Importa conocer que la industria avícola nacional se produce 3.989 millones de toneladas anuales de pollo, siendo ésta, la mitad de la carne producida en el país, cabe ressaltar que el mercado de pollo en el norte de país, solicita la carne sin pigmento, en tanto que el mercado del centro y sureste (que es el más abundante) demanda carne de pollo con piel amarilla (López G. y García JE., 2026)

El principal lugar nacional de producción de cempasúchil es el estado de Tlaxcala, seguido de Puebla y el estado de México. En conjunto se producen 21,000 toneladas de plantas en manojo y 6 millones de plantas en maceta por año. Siendo el principal punto de venta la central de abastos en Iztapalapa. Es importante mencionar que esta planta ha sido mejorada genéticamente en diversos países como China, India y EUA, de donde nos llega semilla para producir planta de cempasúchil con variaciones de sus vistosos colores y formas, para plantación en terreno o en maceta. En México también se trabaja por el mejoramiento genético, como el caso de la Universidad Jesuíta en Guadalajara, el Colegio de posgraduados y en Chapingo (Del Toro, F, 2020). Es importante saber que existen 58 especies de cempasúchil (género *Tagetes*) en el continente americano, de las cuales 35 son nativas de México, uy que la principal especie en el comercio es *Taguetes erecta* (Del Toro, F., 2020).

Dada la accesibilidad de la semilla nativa, de manera local, ha hecho que diversas personan en sus casas, jardines o macetas la produzcan e incluso en los huertos públicos de la ciudad de México, donde se ha fomentado su cultivo con la finalidad de comercializar dado el mercado enorme que representa la temporada de los días de muertos. Aunque varios de estos huertos en la Ciudad de

México están ubicados en parques y jardines debajo de torres que tienen cables de alta tensión por lo que el efecto electromagnético, puede influenciar su desarrollo. Es por ello que es importante conocer que una de las principales revoluciones del siglo XIX y que prevalece hasta hoy, es la del electromagnetismo, el cual comienza con el descubrimiento de la electricidad por Volta y Galvani, es muy interesante saber que la energía eléctrica es la única fuente que las demás conocidas se pueden transformar a ella, así como ser producida en cantidades abundante y ser trasportada a distancias, fácilmente y con relativas pocas perdidas, pero además es necesario saber que los campos electromagnéticos se dan de forma natural en nuestro entorno y por ello, los organismos están habituados a convivir con éstos. Así por ejemplo, alrededor de la tierra, en la atmósfera, hay un importante campo electromagnético procedentes de cargas eléctricas generadas en la ionósfera cuyas fuerzas se dirigen a la superficie terrestre. A esto sumemos que la actividad humana, su estilo de vida e importantes desarrollos ha creado a ritmo muy acelerados numerosos campos electromagnéticos de diversos tipos e intensidades. Mereciendo el lugar preferencial el sistema eléctrico integrado por una variada serie de elementos, tales como los centros de generación, líneas de transporte de alta tensión, estaciones transformadoras, líneas de distribución, aparatos de medida y elementos de consumo, equipos eléctricos industriales, tráfico ferroviario (trenes, tranvías y metro), equipos eléctricos domésticos, emisores y receptores de radio y TV, telefonía móvil, microondas, hornos, tráfico aéreo, televisión vía satélite y radares (Arizábal F., 2024). De tal manera que los organismos estamos dentro de una serie de campos electromagnéticos tanto de origen natural como artificial. A pesar de ello los efectos de la radiación son difíciles de evidenciar en términos convencionales, pues no hay una relación causa-efecto aparente, y como con otros agentes productores de estrés biológico, sus efectos son más evidentes si el terreno orgánico está previamente comprometido o debilitado, dado que, en condiciones de polución electromagnética, el organismo tiene problemas para el mantenimiento de la homeostasis. Finalmente comentar que las ondas electromagnéticas pueden producir efectos biológicos o fisiológicos, que no necesariamente representan un efecto adverso para la salud del organismo, e incluso, podrían ser beneficiosos (Alzábar, F, 2024).

Con la finalidad de conocer si existe algún efecto en el crecimiento y madurez del cempasúchil, establecimos dos plantaciones a 2km de distancia una de la otra: la primera en el Huerto Paulino (HP) en la alcaldía Iztapalapa, bajo efecto de electromagnetismo, y otro alejado de cables de alta tensión (Huerto Salón Oliva, HSO).

METODO

La germinación de la semilla se llevó a cabo en el Huerto Salón Oliva (HSO) y cuando las plantas tuvieron 30 días, se hicieron trasplantaron con el sustrato y cuidados convencional en el HSO y en el huerto Paulino (HP), éste último ubicado debajo de torres de alta tensión por lo cual, estaban bajo la influencia de electromagnetismo, en la Colonia Constitución de 1917, alcaldía de Iztapalapa. El HSO ubicado en la Colonia Consejo Agrarista Mexicano en la misma alcaldía y a 2km de distancia del HP. El riego, deshierbe y demás cuidados fueron convencionales en ambos huertos. En el caso del HP el agua que se utiliza para el riego, es tratada, mientras que en el HSO es potable, aunque los riegos fueron reducidos debido a la temporada de lluvias. Al estar las plantas en franca floración se registró, en 20 unidades de cada huerto, algunas mediciones, utilizando para ello un vernier, báscula y flexómetro. Se registró la altura (desde el inicio del tallo a la punta de la rama más alta), el diámetro del tallo (en la región del inicio de éste) el peso del tallo, considerando con él, el peso de las ramas, hojas, flores y botones. También se registró el número de ramas, separándolas del tallo. El peso de la raíz, en especial la pivotante y las adicionales que se recuperaron al extraerla, así como, el número y peso de flores y finalmente el número y peso de botones. Todos los datos fueron analizados estadísticamente a través de pruebas t-Student con significancia de $p<0.05$

RESULTADO

En ambos huertos, la plantación se estableció el 15 de junio de 2025 (ver fig 3), crecieron adecuadamente. No se tuvieron plantas muertas. El crecimiento fue similar entre ambos huertos, sin

embargo, la floración del cempasúchil en el HP se presentó 2 meses después que en el HSO (1 de enero de 2026 vs 1 de noviembre de 2025), como un efecto importante del electromagnetismo (fig 4) y las plantas del HP mostraron mayor vigor en el crecimiento. Es importante destacar, que con base en la fenología de la especie se establecen las fechas de siembra para empatar la cosecha con la festividad del “día de muertos”.

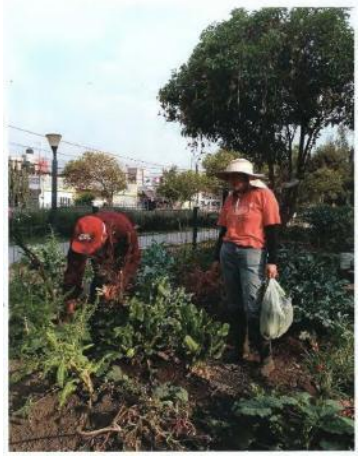


Fig 3 Trasplante del cempasúchil en el huerto Paulino.



Fig 4. El Sr Paulino con el cempasúchil de su huerto bajo electromagnetismo.

En este trabajo se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p<0.05$), entre HSO y HP en las siguientes variables: altura (99.0cm±9.9 vs 162.5cm±23.9, respectivamente, fig 5) diámetro del tallo (0.8cm±0.15 vs 1.4cm±0.4, respectivamente, fig 6), peso del tallo (79.7g± 33.7 vs 428g± 304, respectivamente, fig 9), peso de raíz (13.0g± 7 vs 24.5g± 16, respectivamente, fig 9), peso de flores (44.6g±23.3 vs 50.5g± 64.1, respectivamente), número de ramas (18.3± 4.54 vs 43.1± 14.4, respectivamente, fig 7) y número de botones (3.0± 0.2 vs 13.4± 10.9, respectivamente), lo que denota un crecimiento más vigoroso de las plantas en el HP, con marcado efecto del electromagnetismo. Por otro lado, se observó que no hubo diferencia ($p>0.05$) en el número de flores (13.4± 5.44 vs 15.7± 16.8, respectivamente, fig 8), lo que indica que la floración a pesar lo retrasado en el HO en comparación al HSO, fue semejante en cuanto al número obtenido.

Fig 5. Altura de Planta de cempasúchil según electromagnetismo (EM) (promedio±DE).

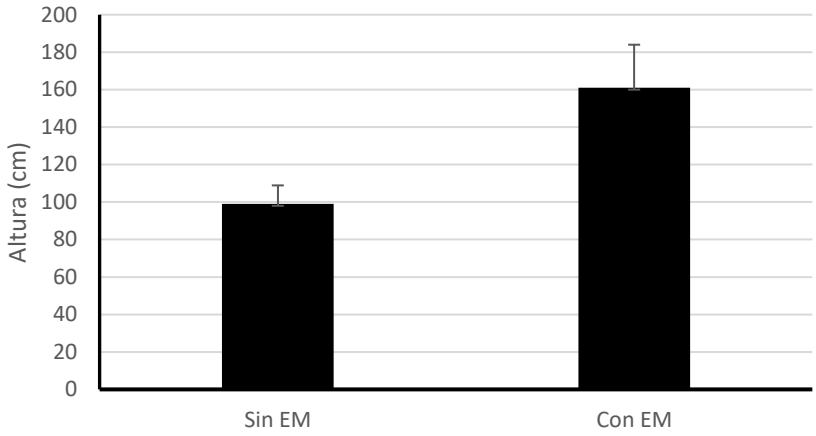


Fig 7. Número de ramas de plantas de cempasuchil según electromagnetismo (EM) (promedio±DE).

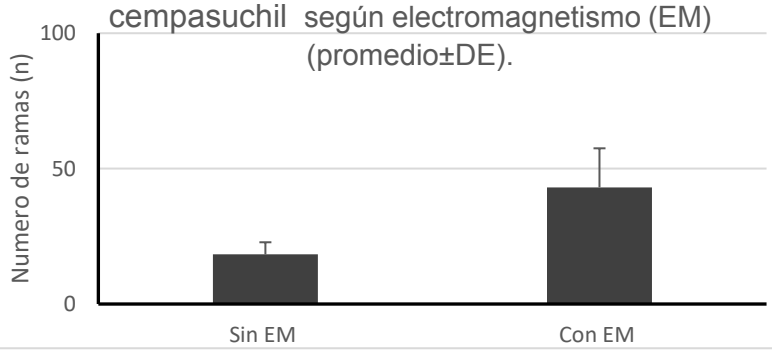
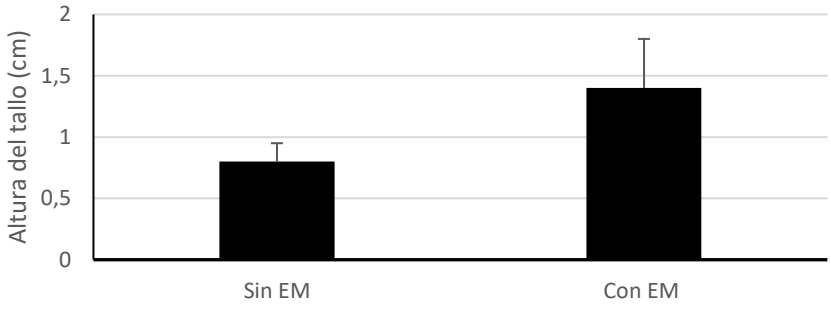
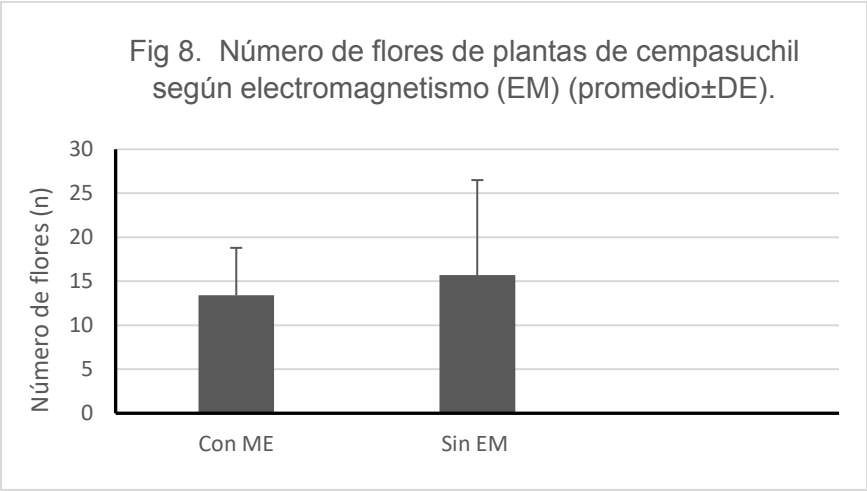
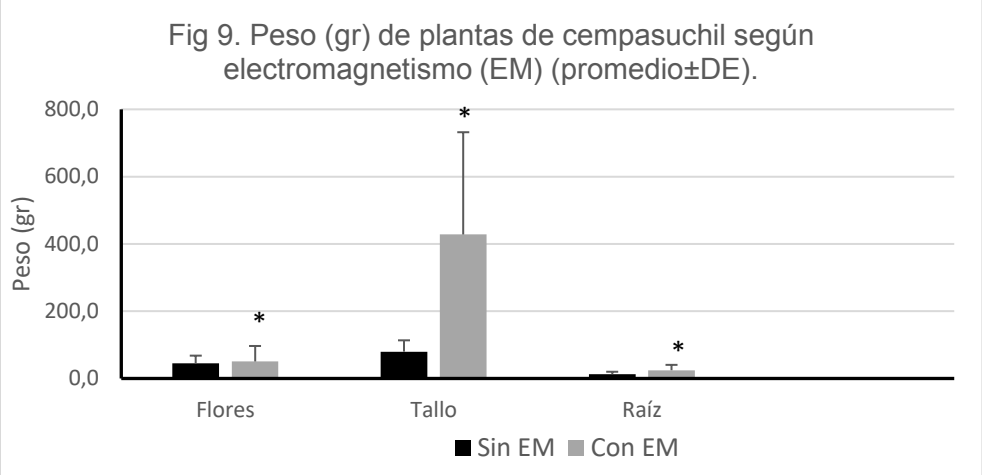


Fig 6. Diámetro del tallo de planta de cempasúchil según electromagnetismo (EM) (promedio±DE).







DISCUSIÓN

La tradición del uso de la flor (planta) de cempasúchil, con fines ornamentales, así como para ofrendar a los difuntos, es desde la época prehispánica. Esta tradición se modifica con el tiempo y quizá cambie radicalmente en algún momento, por ejemplo, en Mixquic, Ciudad de México lugar de fuerte tradición y fervor en 1 y 2 de noviembre se acude al panteón en el atrio de la iglesia, donde además ya no se permite enterrar más personas, por lo que la separación generacional va agrandándose, requiriendo en un tiempo prudente el cambio de lugar hacia el panteón más cercano para rememorar a los difuntos conocidos, o quizá la remoción de restos y abrir la posibilidad de nuevos entierros. O como ocurre e Tetela del Volcán, Morelos, que la prioridad ya no son esos signos y símbolos sino el de los “huehuenches” personas ataviadas con prendas que caracterizan al difunto, danzan al son de música desde el panteón hasta casa de sus familiares, cenas en abundancia y luego regresan danzando al panteón, sirviendo de cuerpo al difunto para la danza, comida y festejo (Torres, F, 2025). En tanto que el cempasúchil siga siendo signo místico relevante para los altares a los difuntos, su producción está sujeta a variaciones climáticas y ambientales, pero en particular a la época de siembra. Lo encontrado en el Huerto Paulino, es que ésta debe hacerse con antelación a otros sitios de cultivo, dado que la influencia del electromagnetismo ejercido por los cables de alta tensión provoco un retraso de dos meses en la floración.

Derivado de esta influencia electromagnética se encontraron diferencias importantes en algunas variables de estudio como la altura, diámetro del tallo, peso del tallo, numero de ramas, peso de flores, y número de botones. En todos ellos fueron más grandes para el HP, en algunos casos, en

un 60 0 70% en otros el doble (100%) y en alguno más (número de botones) hasta el 400% más. Esto da cuenta que el efecto del electromagnetismo genera un crecimiento exacerbado, esto mismo se ha visto en otras plantas de cereales, como el maíz y en algunas hortalizas (Sosa, L., 2023), lo cual orientado hacia una mayor producción puede ser de beneficio. A pesar de lo anterior en el número de flores no se encontraron diferencias significativas entre huertos, lo que puede ser indicativo de que no hay alteración en la información genética y la floración, en el HP, aunque retardada, ocurre de manera normal.

CONCLUSIÓN

Se concluye que el electromagnetismo tiene efectos en el cultivo de cempasúchil generando mayor crecimiento en la planta y retrasando el tiempo de la floración, cambiando con ello, el tiempo de cosecha. Y que, en los huertos de la Ciudad de México, establecidos bajo el cableado de alta tensión, debe ponderarse la época de siembra (sugerimos adelantarla dos meses), para obtener la floración en la fecha deseada.

La agricultura urbana que va en ascenso en Ciudad de México, impulsada por políticas públicas para mejorar la calidad de vida de los habitantes, se enfrenta al reto de reinventar los ciclos de cultivo y cosecha por efecto de la infraestructura de abastecimiento de energía eléctrica indispensable para el mantenimiento de la urbe.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Torres Gómez, F. “El Día de Muertos y el Mictlán: apuntes e imágenes de una tradición mexicana”. *Cultura Regional*, Vol *3*, 5. 2025 https://culturaregional.uanl.mx/index.php/revista/article/view/52
2. G. López G. y J.E. García. “Nivel de pigmentación de las canales de pollo de engorda con pixafil y cempasúchitl”. 2026. Tesis Universidad Agraria Antonio Narro, Estado de Coahuila. https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/51109
3. F. Del Toro, “Mejoramiento Genético del cempasúchil”. 2020 Tlaquepaque Jalisco. Tesis ITESO. Universidad Jesuita de Guadalajara. 30 pp.
4. L. Sosa. “Estudio de la contaminación electromagnética producida por líneas de alta tensión y su relación con los parámetros que definen la línea” 2023. Universidad de la Laguna, Coahuila. Tesis de Ingeniería Electrónica, Industrial. 64 pp.
5. F. Araizábal. “Electromagnetismo y organismos vivos: efectos y usos potenciales” Acta Herediana vol. 67,2, 2024 pp. 119-123 https://doi.org/10.20453/ah.v67i2.4997

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN DE *Pseudomonas Spp.* AISLADAS EN NAYARIT UTILIZANDO POLIETILENGLICOL COMO ÚNICA FUENTE DE CARBONO

Allison Aranxa Saldierna Gómez[1], Edgar Iván Jiménez Ruíz[1], Viridiana Peraza Gómez[1], María Teresa Sumaya Martínez[1], Leticia Casas Godoy[2], María Marcela Robles-Machuca[1*]

[1] Unidad de Tecnología de Alimentos, Secretaría de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Nayarit.[2] SECIHTI–Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C.
*marcela.robles@uan.edu.mx

RESUMEN

La contaminación ambiental por plásticos representa uno de los principales desafíos ambientales en la actualidad debido a su alta persistencia y acumulación en distintos ecosistemas. La búsqueda de alternativas para su eliminación incluye el uso de microorganismos con potencial para degradar polímeros plásticos, volviéndose un tema relevante en la biotecnología. Entre ellos, el género *Pseudomonas*, que ha sido ampliamente reportado debido a diversas especies que han sido asociadas a la degradación de plásticos, destacando *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas putida*. El polietilenglicol (PEG) es un polímero soluble compuesto por unidades repetidas de etilenglicol que ha sido empleado como modelo para evaluar la biodegradación de polímeros sintéticos debido a su estructura química y solubilidad. El objetivo del presente estudio fue evaluar la capacidad de crecimiento de *Pseudomonas spp.* Aisladas en Nayarit en presencia de PEG como única fuente de carbono bajo condiciones controladas, así como analizar las similitudes en sus perfiles proteicos. Las cepas previamente aisladas de diferentes zonas contaminadas de estado de Nayarit fueron cultivadas en medio mínimo sólido (g/L: K2HPO4 1, NH4SO4 1, NaCl 1, MgSO4 7H20 0.5, KH2PO4 0.2, FeSO4 7H2O 0.01, CaCl2 2H2O 0.002, MnSO4 H2O 0.001, CuSO4 5H20 0.001, ZnSO4 7H2O 0.001 y agar bacteriológico 15) suplementado con 0.2% de PEG. El control en presencia de dextrosa indicó viabilidad de crecimiento de las cepas. Las *Pseudomonas* se incubaron a 30ºC por 20 días, mediante una coloración con Azul Brillante de Coomassie G-250 se observó en contraste el crecimiento y la presencia de proteínas extracelulares. El nivel de crecimiento fue clasificado de acuerdo al tamaño de la biomasa bacteriana (mm) y la formación de halo de hidrólisis (intensidad). La relación proteica se analizó mediante espectrometría de masas MALDI-TOF a través de un dendrograma. De las 20 *Pseudomonas spp.* Analizadas, el 55% presentaron un crecimiento positivo en PEG, sugiriendo que son capaces de utilizar este polímero como fuente de carbono, de las cuales destacan *Pseudomonas koreensis* con 16.48 mm (Y152G) y 11.94 mm (A157A), *P. chlororaphis* con 23.39 mm (A156D) y 9.7 mm (Y152F), *P. putida* con 12.24 mm (A112D) y 2.84 mm (A122E) y *Pseudomonas taiwanensis* con 29.21 mm (Y152E) y 23.39 mm (Y157E). El 50% de las *Pseudomonas spp.* mostraron halo intenso al rededor del crecimiento, el cual puede estar asociado a enzimas extracelulares, donde destaca *P. koreensis* (Y152 G y A157A), *P. putida* (A112D y A122E) y *P. chlororaphis* (A160C y A156D). El análisis de agrupamiento mostró dos grupos principales, segregando en un grupo a *P. putida* y *P. taiwanensis* y agrupando en similitud a especies como *P. koreensis, Pseudomonas kilonensis, Pseudomonas protegens* con aquellas asociadas a degradación de plásticos como *Pseudomonas corrugata, Pseudomonas fluorescens, P. aeruginosa* y *P. chlororaphis.* Estos resultados sugieren que las variaciones en los perfiles proteicos y su capacidad de crecimiento en PEG con presencia de proteínas extracelulares abre la posibilidad de estudio de especies antes no asociadas a la degradación de algún tipo de plásticos, los cuales las hace candidatas para aplicaciones en procesos de biotecnología plástica.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos forman parte de nuestra vida diaria, ya que confieren muchas ventajas para el transporte, almacenamiento y realización de diferentes actividades, lo que ha dado una comodidad en la vida diaria. Debido a esto, su producción siguió aumentando desde la década de 1950, por lo tanto, a la par que la población mundial aumenta, también lo hace el consumo del plástico.

La acumulación de estos materiales en el ambiente se ha vuelto un problema ambiental y de salud pública emergente de gran relevancia debido a su persistencia y su dificultad de degradación (Geyer et. al, 2017). La persistencia de los plásticos en el ambiente favorece su fragmentación por factores abióticos como la abrasión física, la luz UV o el contacto con el agua, y factores biológicos, como la acción de microorganismos. Este proceso da origen a partículas menores de 5 mm conocidas como microplásticos, término propuesto por primera vez por Thompson et al. (2004). Debido a su reducido tamaño, los microplásticos pueden dispersarse fácilmente en ecosistemas terrestres, acuáticos y atmosféricos, incrementando su disponibilidad para ser ingeridos por diversos organismos y dificultando su remoción del ambiente. Dentro de las alternativas actuales para reducir la presencia de estos materiales en el ambiente se ha considerado al reciclaje como la primera alternativa, aunque es reconocido que el reciclaje actual es insuficiente para combatir los índices de contaminación (Statista, 2024).

La búsqueda de estrategias sostenibles para erradicar esta contaminación persistente de los plásticos en el ambiente ha impulsado la investigación hacia la biodegradación, la cual que implica el uso de microorganismos capaces de colonizar y degradar polímeros sintéticos.

Entre los microorganismos de interés está el género *Pseudomonas.* Este destaca por su versatilidad metabólica y su capacidad de producir enzimas implicadas en la degradación de compuestos recalcitrantes (Danso *et al*, 2019). Estudios recientes han demostrado que diferentes especies de este género pueden degradar polímeros sintéticos bajo condiciones específicas (Singh & Gupta, 2024), por ejemplo, se ha reportado que *Pseudomonas putida* participa en la degradación de PET, PE y PU (Wei & Zimmermann, 2017; Danso et al., 2019), mientras que *Pseudomonas aeruginosa* ha mostrado capacidad para colonizar y degradar PE, PS y PU (Pathak & Navneet, 2017; Singh & Gupta, 2024). Estos hallazgos sugieren que las bacterias del género *Pseudomonas* poseen mecanismos metabólicos diversos que les permiten interactuar con diferentes tipos de plásticos y contribuir a su biodegradación (Singh & Gupta, 2024).

TEORÍA

El estudio de la biodegradación biológica de plásticos ha impulsado la búsqueda de microorganismos con capacidad para colonizar y degradar estos materiales. Dentro de ellos, las bacterias del género *Pseudomonas* han destacado por su frecuente presencia en ambientes contaminados con residuos plásticos. La exposición prolongada a estos contaminantes ha favorecido el desarrollo de mecanismos metabólicos que les permiten utilizar productos derivados de la degradación de los polímeros como fuente de carbono y energía. Esta capacidad adaptativa ha convertido a *Pseudomonas* en un modelo de estudio para la biodegradación de plásticos; así como, para la identificación de enzimas con potencial biotecnológico para el tratamiento de residuos plásticos sintéticos (Jeyavani et al., 2021; Danso et al., 2019).

Estas enzimas implicadas en la degradación plástica suelen ser divididas como; extracelulares e intracelulares. Las extracelulares son ampliamente estudiadas y poseen funciones oxidativas o hidrolíticas. Entre las más conocidas se encuentran las oxidasas como lacasas, peroxidasas, monooxigenasas, entre; asimismo, hidrolasas como cutinasas, esterasas, lipasas, PETasas y MHETasas, etc., las cuales participan en la oxidación o hidrólisis de enlaces presentes en diferentes polímeros sintéticos. Estas enzimas convierten las largas cadenas principales de carbono de los polímeros plásticos en una mezcla de oligómeros, dímeros y monómeros de menor peso molecular, facilitando su posterior asimilación por los microorganismos (Amobonye et al., 2021).

El polietilenglicol (PEG) es un polímero sintético de etilen-glicol, hidrosoluble y ampliamente utilizado en las industrias farmacéutica, cosmética, alimentaria y química. En estos sectores se emplea como plastificante, lubricante, estabilizante, agente dispersante y auxiliar de procesamiento durante la formulación de productos, debido a su capacidad para modificar propiedades físicas como viscosidad, flexibilidad y solubilidad (Li et al., 2018).

El PEG ha sido utilizado como compuesto modelo para evaluar la capacidad de los microorganismos de metabolizar polímeros sintéticos. Diversas bacterias son capaces de producir enzimas oxidativas, como las PEG-deshidrogenasas y PEG-aldehído deshidrogenasas, así como otras enzimas asociadas a la degradación de polímeros que actúan sobre los enlaces éster presentes en la molécula, generando compuestos de menor peso molecular que pueden incorporarse posteriormente a rutas metabólicas celulares. Por esta razón, el crecimiento microbiano en presencia de PEG suele emplearse como un indicador indirecto del potencial biodegradador de un microorganismo y de su capacidad para producir enzimas involucradas en la transformación de compuestos poliméricos (Li et al., 2018).

PARTE EXPERIMENTAL

Material biológico

Se utilizaron 44 cepas previamente identificadas como *Pseudomonas*, de las cuales se contemplaban 21 como *Pseudomonas. koreensis* y 23 como *Pseudomonas* spp, las cuales fueron aisladas de zonas con alta contaminación plástica en Nayarit. Las cepas fueron reactivadas en agar nutritivo o YPD, según el registro de cada una bajo las condiciones de incubación de 30º C por 24 horas.

Análisis de crecimiento utilizando polietilenglicol (PEG) como sustrato

Se prepararon 600 mL de medio mineral (g/L): K_2HPO_4 1, NH_4SO_4 1, NaCl 1, $MgSO_4$ $7H_2O$ 0.5, KH_2PO_4 0.2, $FeSO_4$ $7H_2O$ 0.01, $CaCl_2$ $2H_2O$ 0.002, $MnSO_4$ H_2O 0.001, $CuSO_4$ $5H_2O$ 0.001 $ZnSO_4$ $7H_2O$ 0.001 y agar bacteriológico a 15. El medio se esterilizó a 121 °C por 15 min. Por otro lado, la dilución de PEG (2 g/L) se preparó en agua destilada estéril y esterilizó en seco con un acrodisco de 45 mm. Seguido, al medio mineral se le añadió la solución de PEG a 2 g/L. El vaciado en cajas de 60x15 mm y sembrado por el método de estría se realizó por duplicado para las 44 cepas totales a analizar de *P. koreensis* y *Pseudomonas* spp. El control de crecimiento se realizó sustituyendo al PEG por dextrosa a 1 g/L, este análisis se realizó en cajas Petri de 90x15 mm por duplicado.

Para evidenciar el crecimiento en presencia de PEG, se realizó una tinción por inundación, la cual se basó en agregar directamente al crecimiento en caja una solución teñidora (0.1 % azul brillante de Coomassie G-250, 40 % de metanol, 10 % de acetona y 50 % de agua destilada) hasta cubrir por completo y se dejó en reposo por 20 minutos. Después se retiró el colorante y se agregó la solución desteñidora (10 % metanol, 40 % Acetona, 50 % agua destilada) por 20 minutos. Después de esto, se le agregó 5 mL de solución desteñidora a cada caja y se dejaron en agitación constante a 50 rpm durante 24 h. El resultado se observó con luz blanca para determinar de forma cualitativa la intensidad de la formación del halo de proteínas alrededor del crecimiento bacteriano. Se utilizó un sistema de evaluación, considerando crecimiento antes y después de la tinción del PEG, considerando; 0 sin crecimiento, 1; crecimiento menor, 2; crecimiento con expansión, 3; crecimiento con formación de contorno resaltable y/o halo.

Análisis de agrupamiento entre *Pseudomonas.*

Se llevó a cabo un análisis de espectrometría de masas a 44 cepas seleccionadas, las cuales se prepararon según la metodología descrita por De la Torre González (2018). La cual se basa en la identificación de las cepas ya aisladas a través del método de espectrometría de masas utilizando el equipo Bruker Daltonik MALDI Biotyper.

Las muestras se llevaron a analizar a las instalaciones del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) A.C, campus Zapopan. Los microorganismos seleccionados se resembraron previamente, para tener un crecimiento máximo preferente de 36 h. Se colocó la biomasa en una placa de acero inoxidable de 96 pocillos por duplicado, agregando 1 µL de ácido fórmico al 70 % para romper la pared celular, se dejó secar a temperatura ambiente y se agregó 1 µL de solución matriz (ácido alfa-ciano-4-hidroxicinámico). Dicha placa es colocada en el equipo en donde el láser permite que la muestra pase de forma sólida a gaseosa generando así una ionización que pasa al analizador y después al detector para generar un espectro. Dicho espectro es comparado con la base de datos en donde se han leído las proteínas y de esa manera identificar las cepas.
El dendrograma se generó utilizando la configuración predeterminada del software de Biotyper MSP, a lo que permite visualizar la relación entre los aislados a nivel proteómico.

RESULTADOS

Análisis de crecimiento de las *Pseudomonas* spp. utilizando PEG como sustrato

Se analizó el crecimiento de 10 *P. koreensis* y 18 *Pseudomonas* spp. en presencia de PEG en medio mineral tras una semana de incubación. El control en presencia de dextrosa indicó viabilidad de crecimiento de la cepa. Actualmente, el trabajo de Skariyachane *et al*. (2015), es el único donde se reporta que aislados de *Pseudomonas* spp. mostraron la capacidad de utilizar PEG en medio sólido mediante el método de zona de aclaramiento.

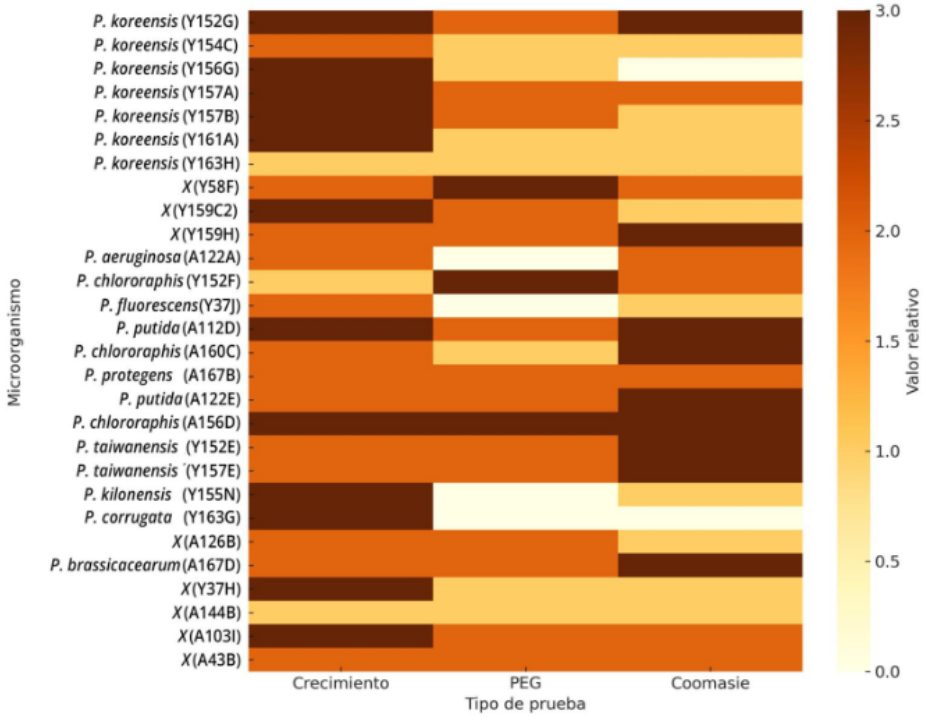


Figura 1. Mapa de calor de los resultados del análisis con PEG como sustrato. Considerando; crecimiento: control de crecimiento con dextrosa, PEG; crecimiento en PEG y Coomassie G-250: resultados de la tinción con Azul Brillante de Coomassie.

La Figura 1 muestra la respuesta comparativa de crecimiento entre las cepas evaluadas de diferentes *Pseudomonas* spp. frente a dos condiciones: dextrosa (control positivo de crecimiento) y crecimiento en presencia de PEG; asimismo, muestra el indicativo de presencias de enzimas extracelulares alrededor del crecimiento capaces de modificar o degradar el PEG al ser teñido con Azul Brillante de

Coomassie. Se realizó la medición del crecimiento y formación de contorno resaltable utilizando el programa informático ImageJ 1.54k, realizando la medición solamente a las de mayor crecimiento.

Las cepas como *P. chlororaphis* (Y152F) y *P. putida* (A112D) mostraron respuestas muy altas en PEG con 9.7 mm y 12.24 mm, respectivamente, a pesar de presentar un crecimiento moderado o bajo, lo que sugiere que podrían destinar una mayor proporción de sus recursos metabólicos a la transformación o utilización del PEG en lugar de a la producción de biomasa. Por otro lado, las cepas de *P. chlororaphis* (A156D) y *P. koreensis* (Y152G) presentaron valores altos tanto en crecimiento con Dextrosa como en PEG con 23.39 mm y 16.48 mm, respectivamente en PEG, lo que sugiere una eficiente utilización o transformación de este tipo de polímeros.

Las cepas de *P. koreensis* (Y152G y Y159H) mostraron halo intenso alrededor del crecimiento al ser teñido con Azul de Coomassie; mientras que, la cepa *P. koreensis* (A157A) mostró poco crecimiento, pero con ligera formación de halo. En el caso de las *Pseudomonas* spp., se mostró halo alrededor del crecimiento en cepas como *P. putida* y *P. chlororaphis* que ya han sido asociadas a la degradación de plásticos, al igual que cepas como *P. taiwanensis* y *P. brassicacearum*. Esto sugiere una mayor producción o acumulación relativa de proteínas extracelulares en las cepas y respalda la hipótesis de que *P. koreensis* podría ser candidata para degradar un polímero sintético.

Las cepas *P. chlororaphis* (A156D), *P. putida* (A112D y A122E), *P. taiwanensis* (Y152E y Y157E) y *P. koreensis* (Y152G) destacaron por presentar valores elevados en dos o más variables evaluadas. Esto muestra la capacidad de ciertas cepas de utilizar un polímero como el PEG como sustrato para su crecimiento, identificando a 10 cepas que muestran potencial con este polímero, considerando las tres condiciones, como candidatas potenciales para degradación de polímeros sintéticos, buscando la formación del halo asociada a la presencia de enzimas hidrolíticas extracelulares que estarían degradando PEG, según lo establecido por Nademo et. al (2023).

Análisis de agrupamiento de *Pseudomonas*

De las 44 cepas analizadas por espectrometría de masas MALDI-TOF, se identificaron 20 cepas a nivel género y especie, siete *P. koreensis* y 13 *Pseudomonas* spp., las cuales su análisis de relación entre ellas a nivel de proteínas fue representado mediante un dendrograma.

El análisis comparativo de los perfiles proteicos de las cepas *Pseudomonas* spp., permitió evaluar similitudes bioquímicas entre diferentes especies de *Pseudomonas* (Figura 2). Se aislaron e identificaron un total de 15 cepas de *Pseudomonas* que, al analizarlas a nivel de proteínas, se observan la formación de dos grupos principales. El grupo identificado con el número 2 agrupó las especies de *P. putida* y *P. taiwanensis* mostrando similitud bioquímica entre ellas. En el grupo 1, se observaron similitud de los perfiles proteicos de *P. koreensis* con *Pseudomonas kilonensi*s, *Pseudomonas corrugata* y *Pseudomonas chlororaphis,* esta última asociada a la degradación de plásticos. Asimismo, hay una similitud cercana a nivel proteico con *Pseudomonas aeruginosa, Pseudomonas fluorescens* y *Pseudomonas protegens*, las cuales ya han sido reportadas y asociadas a la degradación de plásticos (Danso & Chow, n.d.).

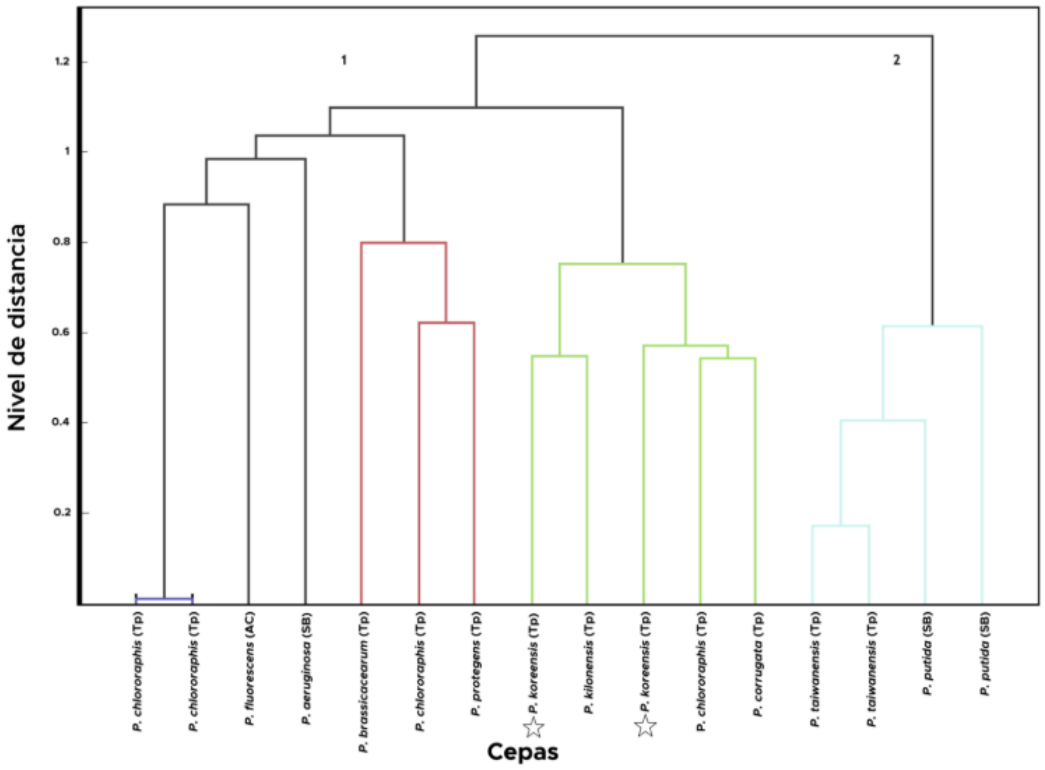


Figura 2. Análisis de agrupamiento de *P. koreensis* con respecto a otras *Pseudomonas.* Los sitios de aislamiento de las cepas fueron variados, siendo Arena Cora (AC), San Blas (SB) y la laguna de Tepetiltic (Tp). El dendrograma se divide en grupos 1 y 2, debido a las ramificaciones señaladas.

El análisis de agrupamiento jerárquico de los perfiles proteicos de siete *P. koreensis* aislados de un sitio de alta contaminación por plástico en Nayarit mostró la formación de dos grupos. El primer grupo integró dos cepas (A161A y Y163H) que mostraron similitud entre ellas. El segundo agrupó las cepas Y154C, Y156G, Y152G y A157B, diferenciándose de ellas la cepa A157A (Figura 3). Estas agrupaciones sugieren que dentro del mismo sitio de aislamiento hay diferenciación bioquímica entre cepas de la misma especie que puede asociarse a la disposición de los nutrientes.

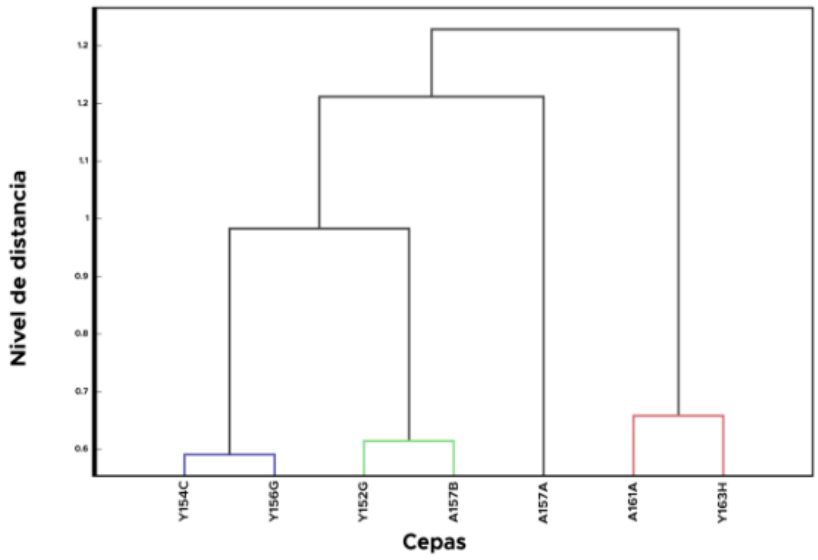


Figura 3. Análisis de agrupamiento de *P. koreensis.* Cepas de *P. koreensis* aisladas de la Laguna de Tepetiltic en Tepic, Nay.

Aunque*, P. koreensis* no ha sido reportada o relacionada con la degradación de plásticos, al mantenerse dentro del mismo grupo proteico puede compartir similitudes bioquímicas con especies que ya han sido relacionadas a la degradación de plásticos, como *P. aeruginosa,* relacionada a la degradación de HDPE, LDPE, PET, y PVC, o a especies como *P. chlororaphis*, relacionada la degradación de plásticos como LDPE (Danso & Chow, n.d.).

CONCLUSIONES

El 55% de las *Pseudomonas* spp. analizadas mostraron capacidad de crecimiento en PEG como única fuente de carbono, destacando *P. taiwanensis*, *P. chlororaphis*, *P. koreensis* y *P. putida* como las cepas con mayor biomasa y formación de halo de hidrólisis, lo que sugiere la producción de enzimas extracelulares con actividad sobre este polímero.

La presencia de halos de hidrólisis teñidos con Azul Brillante de Coomassie G en el 50% de las cepas evidencia la secreción de proteínas extracelulares que podrían estar implicadas en la modificación o degradación del PEG, siendo *P. koreensis*, *P. putida* y *P. chlororaphis* las más destacadas en este aspecto.

El análisis de agrupamiento por MALDI-TOF reveló que *P. koreensis*, especie no reportada previamente en la degradación de plásticos, comparte similitud en su perfil proteico con especies ya asociadas a este proceso como *P. aeruginosa*, *P. fluorescens* y *P. chlororaphis*, lo que la posiciona como una candidata prometedora para estudios de biodegradación de polímeros sintéticos.

Los resultados obtenidos abren la posibilidad de explorar especies de *Pseudomonas* antes no consideradas en procesos de biotecnología plástica, contribuyendo al desarrollo de estrategias biológicas para la degradación de contaminantes poliméricos persistentes en ecosistemas de Nayarit.

BIBLIOGRAFÍA

1. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances, 3*(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782
2. Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). *Lost at sea: Where is all the plastic?* Science, 304(5672), 838.
3. Statista (2024). El mundo está inundado de residuos plásticos. https://es.statista.com/grafico/30051/produccion-mundial-de-residuos-plasticos-por tipo/
4. Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology, 85*(19), e01095-19. https://doi.org/10.1128/AEM.01095-19
5. Singh, J., & Gupta, K. (2024). A systematic review on the main microplastic-degrading bacteria. *Environmental Advances, 15*, 100427. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100427
6. Singh, J., & Gupta, K. (2024). A systematic review on the main microplastic-degrading bacteria. *Environmental Advances, 15*, 100427. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100427
7. Amobonye A, Bhagwat P, Singh S., & Pillai S (2021) Microbios de primera línea en la biodegradación de plásticos y sus enzimas. Sci Total Environ 10:759 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536
8. Jeyavani J, Sibiya A, Shanthini S, Ravi C, Vijayakumar S, Rajan D. K. & Vaseeharan B (2021) Una revisión sobre los impactos acuáticos de los microplásticos y sus aspectos de biorremediación. Curr Pollution Rep 7:286–299

9. Li, D., Jiang, Y., Lv, S., Liu, X., Gu, J., Chen, Q., & Zhang, Y. (2018). Preparation of plasticized poly (lactic acid) and its influence on the properties of composite materials. *PLoS One*, *13*(3), e0193520.
10. De la Torre Gonzalez, F. J., et al. (2018). "Evaluation of matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry for differentiation of Pichia kluyveri strains isolated from traditional fermentation processes." Rapid Commun Mass Spectrom 32(17): 1514-1520.
11. Skariyachan, S., Megha, M., Kini, M. N., Nambiar, S., Rizvi, M. A., & Bhattacharya, S. (2015). Selection and screening of microbial consortia for efficient and ecofriendly degradation of plastic garbage collected from urban and rural areas of Bangalore, India. Environmental Monitoring and Assessment, 187(12), 1-11.
12. Nademo, ZM, Shibeshi, NT y Gemeda, MT (2023). Aislamiento y selección de bacterias degradadoras de bolsas de polietileno de baja densidad (LDPE) del vertedero municipal de residuos sólidos de Addis Abeba “Koshe”. *Annals of Microbiology*, *73* (1), 6.
13. Danso, D., & Chow, J. (n.d.). *PlasticDB* [Base de datos]. Helmholtz Centre for Environmental Research (UFZ). https://plasticdb.org/

NANOPARTÍCULAS DE PLATA (AgNPs) INDUCEN ESTRÉS OXIDATIVO EN EL SIMBIOSISTEMA *Azolla-Anabaena Azollae*

Amelia López-Herrera[1*], Libia Iris Trejo-Téllez[1], Adriana Delgado-Alvarado[2], Fernando Carlos Gómez-Merino[1] e Hilda Araceli Zavaleta-Mancera[1]

[1]Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, [2]Posgrado en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional, Colegio de Postgraduados,
lopez.amelia@colpos.mx

RESUMEN

Las nanopartículas de plata (AgNPs) son usadas ampliamente en la industria, la agricultura y la medicina; sin embargo, su liberación al ambiente puede generar efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. El simbiosistema Azolla-Anabaena azollae está conformado por lóbulos flotantes que albergan en su cavidad a la cianobacteria Anabaena azollae, compuesta por heterocistos (fijadores de N_2) y células vegetativas (fijadoras de CO_2). Este simbiosistema es reconocido por su capacidad fitorremediadora de compuestos orgánicos e inorgánicos. Las AgNPs, una vez dentro de las células, inducen la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO) provocando estrés oxidativo. La presente investigación evaluó el efecto de concentraciones crecientes de AgNPs (0, 1, 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg L^{-1}) en la actividad antioxidante total (AAT, método DPPH). Con base en los resultados obtenidos de AAT, se establecieron en un segundo ensayo, los tratamientos 0, 5, 10, 15, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1} para determinar la actividad de las enzimas antioxidantes: superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX), así como la concentración de proteína soluble (método de Bradford). Las AgNPs se agregaron en un contenedor de plástico con 1 L de solución nutritiva y 1 g del helecho acuático como unidad experimental, con cinco repeticiones en un diseño completamente al azar durante 25 d. Los resultados demostraron que la AAT incrementó significativamente en los tratamientos 10, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1}. La concentración de proteínas solubles no presentó cambios con la exposición a 5, 10 y 15 mg AgNPs L^{-1} con respecto al testigo; sin embargo, a 20 y 40 mg AgNPs L^{-1} disminuyó 20 y 30%. La actividad SOD se incrementó en más de 100% a partir de la concentración de 10 mg AgNPs L^{-1}, respecto al testigo. La actividad CAT aumentó 90% a partir de 40 mg AgNPs L^{-1}. Por otra parte, la actividad APX mostró incrementos de 61 y 54% en 5 y 10 mg AgNPs L^{-1}; y superiores al 100% en 15, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1}; en todos los casos en comparación con el testigo. La disminución en la concentración proteica puede atribuirse tanto a la degradación de proteínas existentes como a una reducción en su síntesis de novo. El incremento en la AAT y en las actividades SOD, CAT y APX sugiere la activación de un mecanismo antioxidante para mitigar el estrés oxidativo inducido por las AgNPs en el simbiosistema Azolla-Anabaena azollae.

INTRODUCCIÓN

Las nanopartículas (NPs) tienen aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la tecnología. Con tamaños que suelen oscilar entre 1 y 100 nm, presentan propiedades químicas, físicas y biológicas únicas que las distinguen de los materiales a granel (Karataş et al., 2026). Estos nanomateriales suelen poseer una elevada relación superficie-volumen, (a menudo entre 35 y 45% mayor que la de partículas de mayor tamaño), conductividad eléctrica y comportamiento plasmónico, lo que les permite exhibir propiedades ópticas, mecánicas y catalíticas novedosas (Abbas et al., 2024).

Las nanopartículas de plata (AgNPs) exhiben una fuerte actividad antibacterial; sin embargo, su toxicidad se considera una desventaja importante a nivel ambiental y de salud humana. El método de síntesis, las propiedades fisicoquímicas y el genotipo vegetal son los factores principales que determinan el potencial de toxicidad de estas NPs en las plantas. La síntesis física, química y biológica son los tres métodos principales y más estudiados para producir AgNPs, cada uno de ellos con sus propios beneficios y desafíos. La síntesis generalmente implica la reducción de iones plata

(Ag^+) a plata metálica (Ag^0), seguida de procesos de nucleación y crecimiento que determinan la forma, el tamaño y la morfología de las NPs.

La síntesis física se basa en procesos descendentes para producir NPs sin el uso de agentes reductores químicos. La síntesis química utiliza agentes reductores y estabilizadores químicos que pueden provocar efectos tóxicos adversos. La síntesis biológica, al ser un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente, utiliza compuestos bioactivos de plantas, bacterias u hongos para mediar la reducción y la estabilización de las NPs resultantes (Sati *et al*., 2025).

Los sedimentos acuáticos son el depósito final de las AgNPs que se originan por deposición atmosférica, escorrentía del suelo agrícola, efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales y eliminación de productos de consumo que las contienen. Su toxicidad ambiental se debe a su persistencia y potencial de bioacumulación. Pueden filtrarse al agua y al suelo, donde alteran las comunidades microbianas vitales para el ciclo de nutrientes y bioacumularse en las cadenas alimentarias, lo que representa un riesgo para los organismos superiores, incluidos los seres humanos (Zhao *et al*., 2021).

Las AgNPs interactúan con los organismos vivos induciendo estrés oxidativo y daño celular, afectando su crecimiento y reproducción. Dicha citotoxicidad y su unión a biomoléculas están fuertemente determinadas por las propiedades intrínsecas de las NPs. Se han implementado métodos de estabilización mediante agentes de recubrimiento orgánicos, inorgánicos, sintéticos, bióticos o abióticos, optimizando así sus propiedades fisicoquímicas y biológicas en entornos complejos (Hosny *et al*., 2025).

En los últimos años, se ha prestado especial atención a la fitotoxicidad de las AgNPs y su impacto en las plantas, consideradas productores primarios y componentes clave de los ecosistemas. Diversos estudios demuestran que estas NPs logran ingresar al sistema vegetal, donde interactúan con estructuras como paredes celulares, membranas y orgánulos, desencadenando alteraciones fisiológicas y bioquímicas potencialmente perjudiciales (Kwak *et al*., 2023).

El mecanismo probable de interacción de las AgNPs con las plantas puede ser a partir de la liberación de iones plata (Ag^+), los cuales entran en la célula a través de canales iónicos y proteínas transportadoras de membrana, o bien por endocitosis, a través de la invaginación de la membrana plasmática y la generación de vesículas que transportan las AgNPs al interior de la célula y generan una alteración intracelular (López-Herrera *et al*., 2021, 2024).

La interacción de las AgNPs con moléculas esenciales como el ADN, lípidos y proteínas altera sistemas esenciales para la homeostasis celular. Un ejemplo de esto es la disrupción de la síntesis proteica inducida por daños ribosomales, la cual genera lesiones irreversibles. Paralelamente, la liberación de Ag^+ compromete la integridad estructural de las proteínas mediante la escisión de puentes disulfuro, suprimiendo su actividad biológica. La consecuente desnaturalización e inactivación proteica colapsa vías metabólicas, de transducción de señales y de reparación, disminuyendo la tasa de supervivencia celular (Karataş *et al*., 2026).

Además, las AgNPs pueden inducir estrés oxidativo al desequilibrar la relación entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ERO) y la capacidad de las plantas para contrarrestar dicho impacto a través de sistemas de defensa antioxidante, tanto de naturaleza enzimática como no enzimática (Sachdev & Ahmad, 2021). Se ha demostrado que las AgNPs promueven la generación de diferentes ERO, como el radical anión superóxido ($O_2^{\bullet -}$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los radicales hidroxilo (•OH) en las células vegetales, causando así daño oxidativo a los componentes celulares y biomoléculas vitales como el ADN, el ARN, las proteínas y los lípidos (Iannelli *et al*., 2022; Padhye *et al*., 2023).

En el ámbito de las macrófitas acuáticas, la exposición de *Lemna gibba* a AgNPs induce la generación de ERO intracelulares, con una correlación positiva entre la concentración de las NPs y el estrés oxidativo resultante (Oukarroum *et al*., 2013). De igual manera, en *Spirodela polyrhiza*

tratada con PVP-AgNPs (20-22.9 nm), la aplicación de 10 mg L^{-1} estimula la actividad SOD y peroxidasa (POD). A nivel celular, este tratamiento provocó alteraciones ultraestructurales en los cloroplastos, como acumulación de almidón y reducción de tilacoides intergranales, además de un aumento en los niveles de ERO y glutatión (Jiang *et al*., 2014).

Se han investigado los efectos fitotóxicos inducidos en *Lemna minor* y *Lemna minuta* tras la exposición a nitrato de plata ($AgNO_3$) y AgNPs estabilizadas con citrato de sodio y L-cisteína (AgNPs-Cit-L-Cys) a diferentes concentraciones (0, 20 y 50 mg L^{-1}) y tiempos (7 y 14 d).

El $AgNO_3$ y las AgNPs-Cit-L-Cys produjeron efectos fitotóxicos en ambas especies de lenteja de agua (reducción en el crecimiento vegetal, reducción de clorofila y aumento de malondialdehído), que se intensificaron con el incremento de las concentraciones y los tiempos de exposición. Asimismo, ambas especies mostraron un incremento en las actividades APX y CAT cuando fueron expuestas a $AgNO_3$ y AgNPs-Cit-L-Cys, comparadas con las plantas testigo, excepto las plantas de *L. minuta*, cuando fueron expuestas a altas concentraciones de $AgNO_3$ (Iannelli *et al*., 2022).

Por consiguiente, este trabajo evaluó el efecto de concentraciones crecientes de AgNPs (0, 1, 5, 10, 20, 40, 80 y 100 mg L^{-1}) sobre la actividad antioxidante total (AAT). Con base en estos resultados, se seleccionaron las dosis de 0, 5, 15, 20 y 40 mg L^{-1} para un segundo ensayo. En este, se determinó la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX), además de la concentración de proteína soluble. Esta investigación analiza los efectos fitotóxicos e implicaciones ambientales de las AgNPs, impulsando el avance de la nanotecnología sostenible.

PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizaron AgNPs de formulación Argovit-C™, a una concentración del 3%, las cuales están conjugadas con polivinilpirrolidona (PVP) y colágeno hidrolizado.

Las AgNPs se caracterizaron mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM FEI TECNAI F30) para caracterizar su tamaño y morfología. Mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) se corroboró su composición química. Asimismo, se determinó el diámetro hidrodinámico, índice de polidispersidad y potencial Z con un Zetasizer Nano (Malvern Instruments Ltd., UK). Posteriormente, las AgNPs se agregaron en un contendedor de plástico con 1 L de solución nutritiva y 1 g del helecho acuático como unidad experimental, con cinco repeticiones en un diseño completamente al azar durante 25 d. Finalmente se determinó la actividad antioxidante total (AAT, método DPPH). Con base en los resultados obtenidos de AAT, se establecieron en un segundo ensayo, los tratamientos 0, 5, 15, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1} para determinar la actividad de las enzimas antioxidantes: superóxido dismutasa (SOD, EC 1.15.1.1) (Dhindsa *et al*., 1981), catalasa (CAT, EC 1.11.1.6) (Aebi, 1984) y ascorbato peroxidasa (APX, EC 1.11.1.11) (Nakano & Asada, 1981), así como la concentración de proteína soluble por el método de Bradford (Bradford, 1976). El análisis estadístico se realizó mediante un ANOVA (Tukey, $p \leq 0.05$) (**Figura 1**).

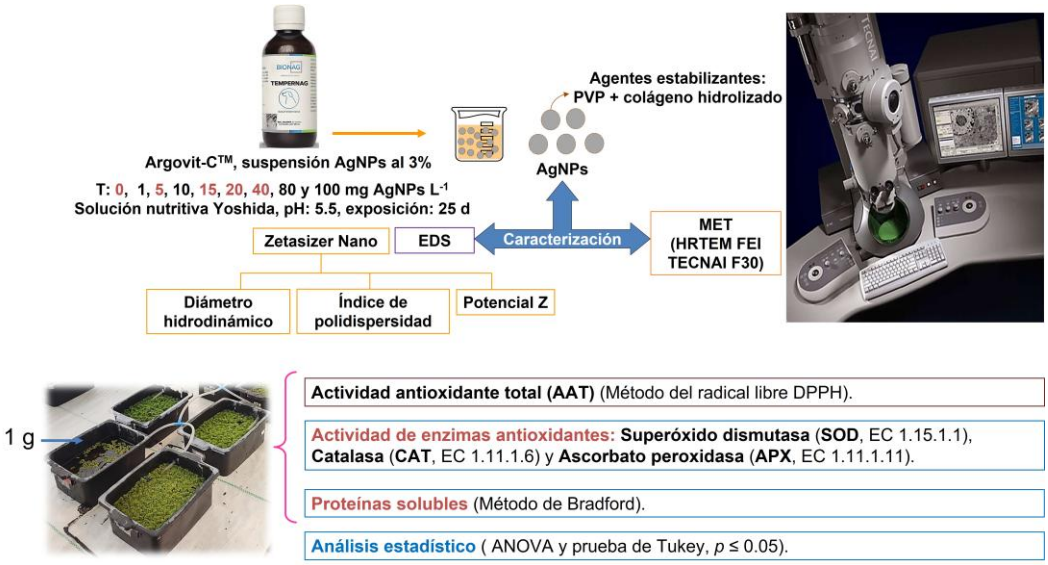


Figura 1. Flujo de trabajo experimental seguido para este estudio.

RESULTADOS

Las AgNPs Argovit-C™ son una formulación usada en la industria farmacéutica veterinaria. Se confirmó la morfología esferoidal, el tamaño nanométrico (11.51 nm) y la presencia de Ag mediante EDS (**Figura 2A-B**). Las características fisicoquímicas de las AgNPs se presentan en el **Cuadro 1**. La AAT incrementó significativamente en 10, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1} (**Cuadro 2**). La concentración de proteínas solubles no presentó cambios con 5, 10 y 15 mg AgNPs L^{-1}; sin embargo, disminuyó entre 20 y 30% a 20 y 40 mg AgNPs L^{-1} (**Figura 3**). La actividad SOD aumentó en más de 100% a partir de la concentración de 10 mg AgNPs L^{-1}, respecto al testigo (**Figura 4**). La actividad CAT incrementó 90% a partir de 40 mg AgNPs L^{-1} (**Figura 5**). Asimismo, la actividad APX aumentó 61 y 54% en 5 y 10 mg AgNPs L^{-1}, y más de 100% en 15, 20 y 40 mg AgNPs L^{-1}; en comparación con el testigo (**Figura 6**).

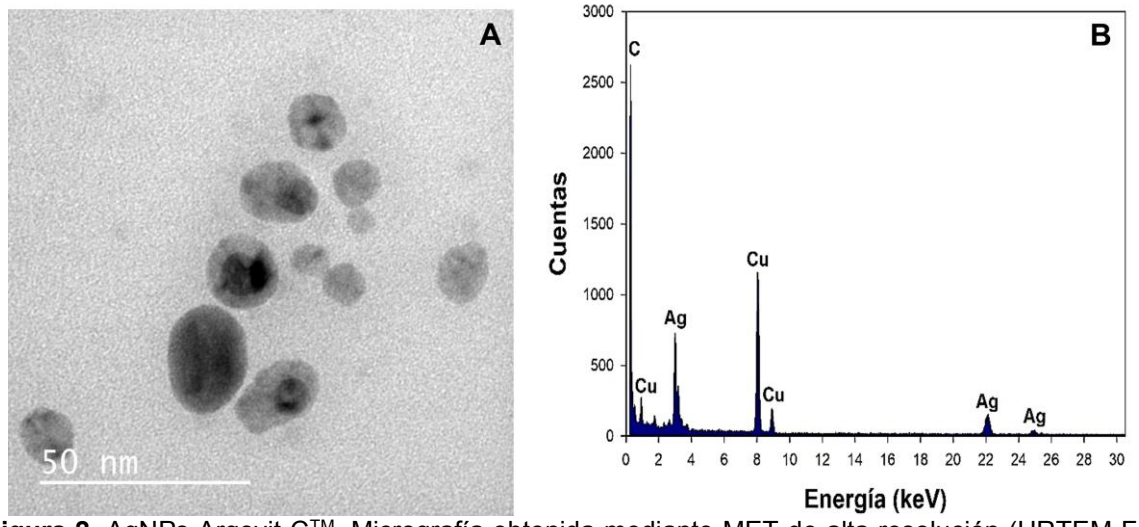


Figura 2. AgNPs Argovit-C™. Micrografía obtenida mediante MET de alta resolución (HRTEM FEI TECNAI F30) campo claro (A) y espectro EDS de las AgNPs (B).

Cuadro 1. Características fisicoquímicas de las AgNPs Argovit-C™

Propiedades	Promedio
Morfología de las AgNPs	esferoidal
Diámetro de las AgNPs por MET	11.51 ± 0.17 nm
Diámetro hidrodinámico: plata metálica con PVP y colágeno hidrolizado	53 nm
Potencial Z	9.3 mV
Índice de polidispersidad (IPD)	0.33

Cuadro 2. Actividad antioxidante total a los 15, 30 y 60 min en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs.

AgNPs (mg L^{-1})	Actividad antioxidante total (mg g^{-1} biomasa fresca)		
	15 min	30 min	60 min
0	0.41 ± 0.05 c	0.41 ± 0.05 c	0.38 ± 0.06 c
1	0.44 ± 0.05 bc	0.43 ± 0.05 bc	0.40 ± 0.05 bc
5	0.57 ± 0.07 bc	0.57 ± 0.07 bc	0.55 ± 0.07 bc
10	0.93 ± 0.03 a	0.95 ± 0.03 a	0.95 ± 0.04 a
20	0.72 ± 0.09 ab	0.73 ± 0.10 ab	0.72 ± 0.10 ab
40	0.72 ± 0.10 ab	0.73 ± 0.10 ab	0.72 ± 0.11 ab
80	0.54 ± 0.04 bc	0.54 ± 0.04 bc	0.52 ± 0.04 bc
100	0.46 ± 0.02 bc	0.47 ± 0.02 bc	0.46 ± 0.02 bc

Media ± EE con letra diferente en cada columna indican diferencia estadística significativa entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n = 3.

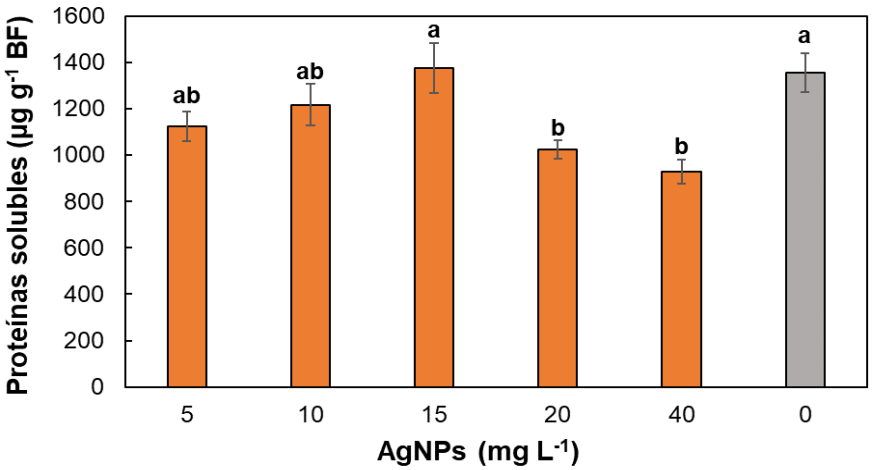


Figura 3. Concentración de proteínas solubles del simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs. Medias ± EE con letra diferente sobre las barras indican diferencia estadística significativa entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n = 4. BF: biomasa fresca.

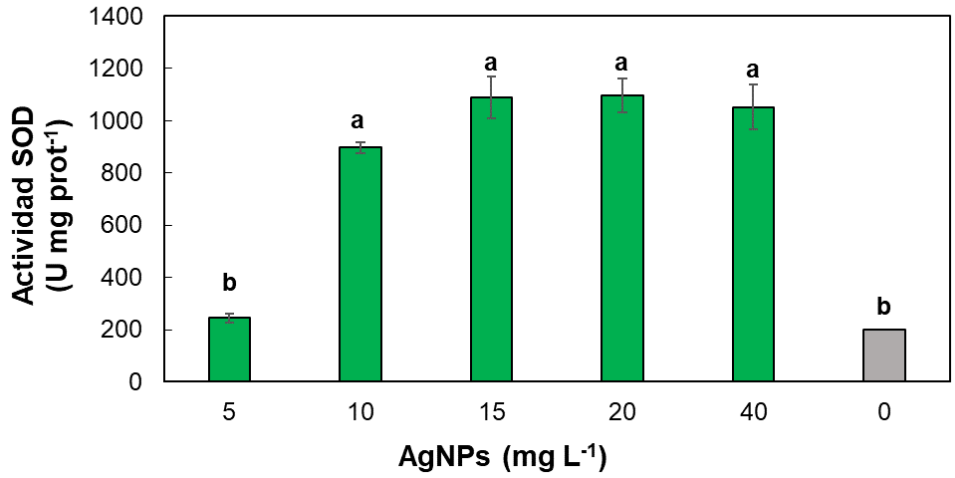


Figura 4. Actividad de la enzima superóxido dismutasa (SOD) en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs. Medias ± EE con letra diferente sobre las barras indican diferencia estadística significativa entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n = 4. Prot: proteína. U = µmoles min^{-1} mL^{-1}.

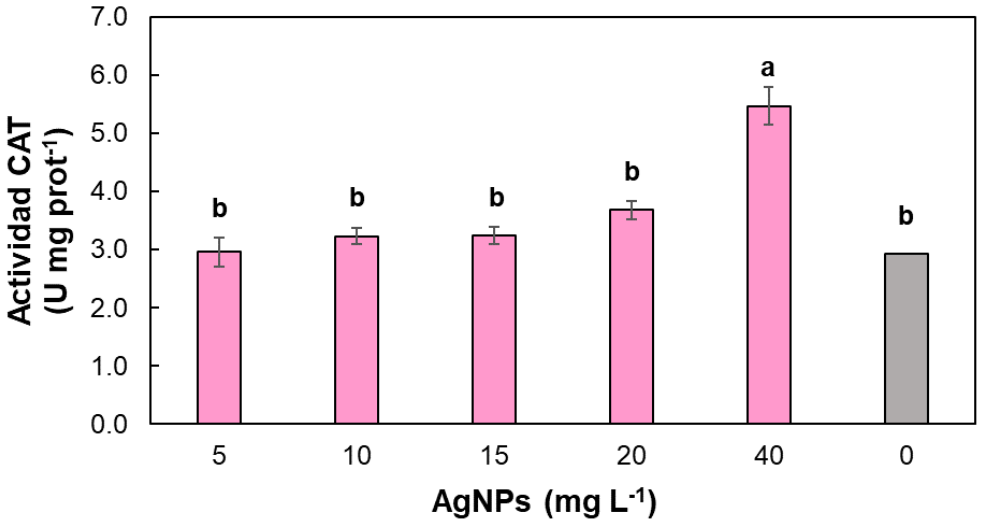


Figura 5. Actividad de la enzima catalasa (CAT) en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs. Medias ± EE con letra diferente sobre las barras indican diferencia estadística significativa entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n = 4. Prot: proteína. U = µmoles min^{-1} mL^{-1}.

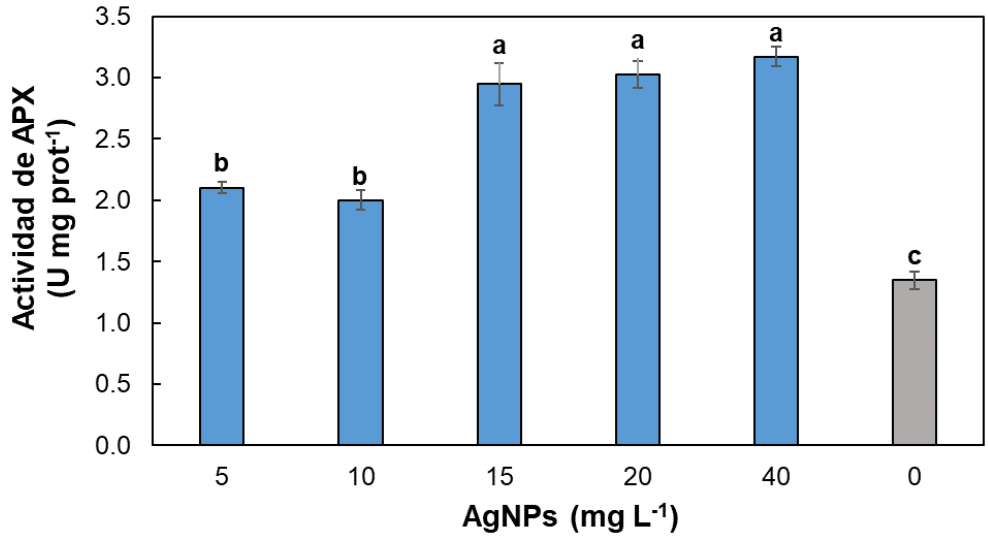


Figura 6. Actividad de la enzima ascorbato peroxidasa (APX) en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae* después de 25 d de cultivo en concentraciones crecientes de AgNPs. Medias ± EE con letra diferente sobre las barras indican diferencia estadística significativa entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$), n = 4. Prot: proteína. U = μmoles min^{-1} mL^{-1}.

DISCUSIÓN

Comprender los efectos fitotóxicos de las AgNPs es fundamental para evaluar sus implicaciones ambientales y orientar el desarrollo de nanomateriales seguros. La respuesta enzimática coordinada de SOD, CAT y APX podría ser parte de una estrategia para contrarrestar la sobreproducción de especies reactivas de oxígeno (ERO).

Cuando las AgNPs se liberan al medio ambiente, se oxidan y la plata se transforma en su forma iónica (Ag^+). Este ion es absorbido posteriormente por las plantas y se transporta a través de sus tejidos. La forma Ag^+ presenta una mayor reactividad y promueve la producción de ERO mediante la formación de enlaces con componentes celulares, lo que altera el metabolismo y la función celular y, en última instancia, provoca fitotoxicidad (Noori *et al*., 2024).

La aplicación de recubrimientos a las AgNPs, que alteran su estabilidad, solubilidad y reactividad, también puede influir en la liberación de Ag^+ y modular su toxicidad. Por ejemplo, las AgNPs recubiertas con PVP presentan mayor estabilidad y menor degradación en el medio ambiente en comparación con las AgNPs sin recubrimiento; por lo tanto, pueden mostrar mayor toxicidad para los organismos, incluidas las plantas (Biba *et al*., 2020).

CONCLUSIONES

La disminución en la concentración de proteínas puede atribuirse tanto a la degradación proteica como a una reducción en la síntesis *de novo*. El incremento de la AAT y de las actividades SOD, CAT y APX sugiere la activación de un mecanismo antioxidante para mitigar el estrés oxidativo inducido por las AgNPs en el simbiosistema *Azolla-Anabaena azollae*.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. López-Herrera, M. Ávalos-Borja, J.R. García-Nava, L.I. Trejo-Téllez, A. Alarcón, A. Patrón-Soberano, V. Conde-Martínez, & H.A. Zavaleta-Mancera, “Interaction of silver nanoparticles with

the aquatic fern *Azolla filiculoides*: Root structure, particle distribution, and silver accumulation", J. Nanoparticle Res., Vol. 23, 13, 2021.
2. A. López-Herrera, F.C. Gómez-Merino, H. A. Zavaleta-Mancera, M. Avalos-Borja, J.R. García-Nava, & L.I. Trejo-Téllez, "Effect of silver nanoparticles (AgNPs) on aquatic and wetland plants", Environments, Vol. 11, 297, 2024.
3. A. Oukarroum, L. Barhoumi, L. Pirastru, & D. Dewez, "Silver nanoparticle toxicity effect on growth and cellular viability of the aquatic plant *Lemna gibba*", Environ. Toxicol. Chem., Vol. 32, 4, 2013, pp. 902–907.
4. A. Sati, T.N. Ranade, S.N. Mali, H.K.A. Yasin, & A. Pratap, "Silver Nanoparticles (AgNPs): Comprehensive insights into bio/synthesis, key influencing factors, multifaceted applications, and toxicity", ACS Omega, Vol. 10, 2025, pp. 7549–7582.
5. H. Aebi H, "Catalase *in vitro*", Meth. Enzymol., Vol. 105, 1984, pp. 121–126.
6. H. Karataş, F. Eker, E. Akdaşçi, M. Bechelany, & S. Karav, "Silver nanoparticles in antibacterial research: mechanisms, applications, and emerging perspectives", Int. J. Mol. Sci., Vol. 27, 927, 2026.
7. H.S. Jiang, X.N. Qiu, G.B. Li, W. Li, & L.Y. Yin, "Silver nanoparticles induced accumulation of reactive oxygen species and alteration of antioxidant systems in the aquatic plant *Spirodela polyrhiza*", Environ. Toxicol. Chem., Vol. 33, 6, 2014, pp. 1398–1405.
8. J. Zhao, X. Wang, S.A. Hoang, N.S. Bolan, M. Kirkham, J. Liu, X. Xia, & Y. Li, "Silver nanoparticles in aquatic sediments: Occurrence, chemical transformations, toxicity, and analytical methods", J. Hazard. Mater., Vol. 418, 126368, 2021.
9. J.I. Kwak, S.H. Nam, & Y.J. An, "Assessing the risks of silver nanoparticle-concentrated matrix application in agricultural soil: Implications for plant and soil enzymes", Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol., Vol. 269, 109631, 2023.
10. L.P. Padhye, T. Jasemizad, S. Bolan, O.V. Tsyusko, J.M. Unrine, B.K. Biswal, R. Balasubramanian, Y. Zhang, T. Zhang, J. Zhao, & Y. Li, "Silver contamination and its toxicity and risk management in terrestrial and aquatic ecosystems", Sci. Total Environ., Vol. 871, 161926, 2023.
11. M. Iannelli, A. Bellini, I. Venditti, B. Casentini, C. Battocchio, M. Scalici, & S. Ceschin, "Differential phytotoxic effect of silver nitrate ($AgNO_3$) and bifunctionalized silver nanoparticles (AgNPs-Cit-L-Cys) on *Lemna* plants (duckweeds)", Aquat. Toxicol., Vol. 250, 106260, 2022.
12. M.M. Bradford, "A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding", Anal. Biochem., Vol. 72, 1976, pp. 248–254.
13. M. Noori, R. Hasanuzzaman, M. Roychowdhury, S. Sarraf, S. Afzal, S. Das, & A. Rastogi, "Silver nanoparticles in plant health: Physiological response to phytotoxicity and oxidative stress", Plant Physiol. Biochem., Vol. 209, 108538, 2024.
14. R. Abbas, J. Luo, X. Qi, A. Naz, I.A. Khan, H. Liu, S. Yu, & J. Wei, "Silver nanoparticles: synthesis, structure, properties and applications", Nanomaterials, Vol. 14, 1425, 2024.
15. R. Biba, D. Matić, D.M. Lyons, P.P. Štefanić, P. Cvjetko, M. Tkalec, D. Pavoković, I. Letofsky-Papst, & B. Balen, "Coating-dependent effects of silver nanoparticles on tobacco seed germination and early growth", Int. J. Mol. Sci., Vol. 21, 10, 2020.
16. R.S. Dhindsa, P. Plumb-Dhindsa, & T.A. Thorpe, "Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase", J. Exp. Bot., Vol. 32, 1981, pp. 93–101.
17. S. Hosny, G.A. Gaber, M.S. Ragab, M.A. Ragheb, M. Anter, & L.Z. Mohamed, "A comprehensive review of silver nanoparticles (AgNPs): synthesis strategies, toxicity concerns, biomedical applications, AI-Driven advancements, challenges, and future perspectives", Arab. J. Sci. Eng., 2025.
18. S. Sachdev & S. Ahmad, "Role of nanomaterials in regulating oxidative stress in plants", in *Nanobiotechnology: Mitigation of Abiotic Stress in Plants* (Springer, Cham. Switzerland, 2021), pp. 305–326.
19. Y. Nakano & K. Asada, "Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplast", Plant Cell Physiol., Vol. 22, 5, 1981, pp. 867–880.

LEGUMBRES COMO ALTERNATIVA PROTEICA SOSTENIBLE EN LA ALIMENTACIÓN DE ANIMALES NO HUMANOS

Axel André López Joaquín[1], Ana Cristina Díaz Díaz[1], José Herrera Camacho[2], Berenice Yahuaca Juárez[1]

[1]Facultad de Químico Farmacobiología, [2]Instituto de Investigaciones Agrícolas y Forestales, UMSNH

berenice.yahuaca@umich.mx.

RESUMEN

Actualmente, la producción pecuaria enfrenta un panorama complejo en el que convergen exigencias de eficiencia productiva, calidad nutricional y sostenibilidad ambiental. La dependencia de insumos como la harina de soya ha generado preocupaciones relacionadas con la presión sobre recursos naturales, la competencia con la alimentación humana y la variabilidad de costos en el mercado. En este contexto, es importante explorar fuentes proteicas vegetales que aporten nutrimentos, estén disponibles regionalmente y contribuyan a sistemas agroalimentarios equilibrados. Las legumbres dada su composición química, su adaptabilidad agronómica y su tradición en los sistemas productivos de México, representan una opción destacable. Por lo anteriormente mencionado el objetivo del presente trabajo fue analizar comparativamente las propiedades nutrimentales y tecno-funcionales de lenteja (*Lens culinaris* M.), haba (*Vicia faba*) y garbanzo (*Cicer arietinum*) como alternativas en la alimentación de animales no humanos. Se evaluaron características físicas (tamaño, peso hectolítrico y color), composición química proximal (humedad, proteína, fibra cruda, extracto etéreo y cenizas) y tecno-funcionalidad (AOAC): índice de absorción en agua (IAA) e índice de solubilidad en agua (ISA). Los resultados muestran diferencias significativas entre las legumbres analizadas. La lenteja tiene un alto contenido de proteína (30.62%) y fibra cruda (10.92%), comparativamente con haba (26.37% proteína; 3.0% fibra) y garbanzo (22.74% proteína; 4.80% fibra). El garbanzo presentó el mayor contenido lipídico (5.08%), mientras que haba y lenteja mostraron valores inferiores. El contenido de cenizas se ubicó entre 2.80 y 3.40%, siendo una fuente destacable de micronutrientes. En cuanto a las propiedades de tecno-funcionalidad, el garbanzo mostró mayor capacidad de absorción de agua, mientras que la lenteja presentó mayor índice de solubilidad, características que inciden en el comportamiento tecnológico durante la formulación de alimentos. Es importante mencionar que las legumbres, y particularmente la lenteja, además de aportar proteína de calidad también es alta en componentes funcionales que facilitan su incorporación en dietas para animales no humanos como aves, porcinos y otras especies. Su uso puede considerarse como sustitución parcial de harinas proteicas convencionales bajo esquemas de formulación que contemplen la adecuada digestibilidad. La integración de legumbres en la alimentación animal no humana puede fortalecer cadenas productivas locales y tener modelos más sostenibles. Diversificar las fuentes proteicas implica tener responsabilidad frente al uso de recursos agrícolas y la seguridad alimentaria en su dimensión integral.

INTRODUCCIÓN

La producción pecuaria se encuentra condicionada a mantener niveles adecuados de eficiencia productiva bajo esquemas que sean compatibles con: sostenibilidad ambiental, seguridad alimentaria y disponibilidad de recursos. Esto ha conducido a una dependencia de fuentes proteicas convencionales, destacando la harina de soya, lo que ha conducido a su vez a un incremento en costos de producción, presión sobre recursos naturales y, sobre todo, competencia con la alimentación humana. Bajo este contexto, es importante buscar materiales vegetales alternativos, tales como las legumbres, estas representan una de las principales alternativas debido a su aporte nutrimental, adaptabilidad agronómica y potencial para integrarse en esquemas de producción sostenibles. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) reconoce a las legumbres como cultivos estratégicos debido a su capacidad para contribuir a la

nutrición, salud del suelo y sostenibilidad agrícola (FAO, 2024). Así mismo, su capacidad de fijar nitrógeno al suelo puede permite disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos y mejorar la fertilidad del suelo (Vance et al., 2000).

Entre las legumbres de interés agroalimentario destaca la lenteja (*Lens culinaris* M.), una especie ampliamente cultivada y consumida en diversas regiones del mundo. La lenteja presenta un elevado contenido de proteína (entre 20 y 30 %), además de fibra dietética, almidón, minerales y compuestos bioactivos (Saperas et al., 2023). Diferentes investigaciones han señalado que esta legumbre constituye una fuente importante de hierro, zinc, folatos y compuestos fenólicos con capacidad antioxidante, lo que incrementa su interés en la alimentación humana y como ingrediente funcional en la nutrición animal no humana (Liberal et al., 2023).

Además de su composición química, la lenteja presenta propiedades tecno-funcionales relevantes para la formulación de alimentos. Su contenido proteico y la presencia de polisacáridos hidrofílicos favorecen propiedades como absorción y solubilidad en agua, las cuales influyen en procesos de mezclado, hidratación, peletizado y extrusión. Estas propiedades tecno-funcionales son importantes ya que pueden modificar la estabilidad física y el comportamiento tecnológico de los alimentos destinados a especies de animales no humanos. Por su parte, el haba (*Vicia faba*) y el garbanzo (*Cicer arietinum*) también representan matrices vegetales con potencial proteico. El haba presenta contenidos de proteína que pueden oscilar entre 24 y 32 %, además de cantidades importantes de almidón, mientras que el garbanzo contiene aproximadamente entre 18 y 25 % de proteína y un mayor contenido lipídico, generalmente entre 4 y 7 %, contribuyendo al aporte energético de las formulaciones (Saperas et al., 2023; Martineau-Côté et al., 2022).

Diversos estudios han demostrado que las legumbres pueden emplearse como sustitutos parciales de ingredientes proteicos convencionales en alimentación animal. David et al. (2024) reportaron que especies como lenteja, haba, chícharo y lupino pueden incorporarse en dietas para aves y porcinos siempre que se consideren factores como digestibilidad, perfil de aminoácidos y contenido de compuestos antinutricionales. La presencia de factores antinutricionales es común en las legumbres, incluyendo lenteja, haba y garbanzo. Entre los principales compuestos destacan ácido fítico, taninos condensados, inhibidores de tripsina, lectinas y oligosacáridos no digeribles, los cuales pueden afectar la digestibilidad proteica y la biodisponibilidad de minerales dependiendo de la concentración y del nivel de inclusión en la dieta (Martineau-Côté et al., 2022; Xu y Chang, 2007). En lenteja se han reportado contenidos de ácido fítico cercanos a 0.4–1.5 % y taninos entre 0.3 y 1.3 %, mientras que en haba y garbanzo estos compuestos pueden encontrarse en proporciones variables dependiendo de la variedad y condiciones de procesamiento.

Diferentes tratamientos tecnológicos como imbibición, cocción, germinación, fermentación y extrusión pueden disminuir significativamente el contenido de estos compuestos antinutricios y mejorar la digestibilidad de proteínas y carbohidratos presentes en las legumbres (Saperas et al., 2023). Particularmente, la extrusión favorece la desnaturalización proteica, gelatinización del almidón e inactivación parcial de inhibidores de tripsina y otros factores antinutricionales. Por esta razón, las legumbres pueden considerarse ingredientes viables para formulaciones destinadas a animales no humanos bajo esquemas de inclusión parcial y procesamiento adecuado. Finalmente, la incorporación de legumbres en sistemas pecuarios también se relaciona con estrategias de sostenibilidad y soberanía alimentaria. La diversificación de fuentes proteicas puede favorecer cadenas productivas locales, disminuir la dependencia de monocultivos y promover un uso equilibrado de recursos agrícolas. Esto se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 2 relacionado con hambre cero y agricultura sostenible, y el ODS 12 enfocado en producción y consumo responsables.

Por lo anteriormente mencionado, el objetivo del presente trabajo fue analizar comparativamente las propiedades nutrimentales y tecno-funcionales de lenteja (*Lens culinaris* M.), haba (*Vicia faba*) y garbanzo (*Cicer arietinum*) como alternativas proteicas sostenibles en la alimentación de animales no humanos.

TEORÍA

Las legumbres son semillas secas comestibles pertenecientes a la familia Fabaceae y constituyen una de las principales fuentes de proteína vegetal en sistemas alimentarios tradicionales. Estas matrices presentan contenidos importantes de proteína, carbohidratos complejos, fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos (Saperas et al., 2023). Entre las legumbres de mayor interés nutricional destaca la lenteja (*Lens culinaris* M.), debido a su elevado contenido proteico y a la presencia de compuestos funcionales asociados con beneficios nutricionales y tecnológicos.

La proteína de lenteja puede representar entre 20 y 30 % del peso seco de la semilla, dependiendo de factores genéticos y agronómicos (Khazaei et al., 2019). Además, contiene aminoácidos esenciales relevantes para la nutrición animal, aunque presenta limitaciones en aminoácidos azufrados como metionina y cisteína. Su composición también incluye almidón, fibra dietética soluble e insoluble, minerales y compuestos fenólicos con actividad antioxidante. El contenido de fibra en la lenteja es importante desde el punto de vista fisiológico y tecnológico, ya que esta puede favorecer procesos digestivos y contribuir a la salud intestinal en determinadas especies animales; sin embargo, niveles elevados pueden disminuir la digestibilidad energética en monogástricos si no se controla adecuadamente el porcentaje de inclusión en las dietas. Además del aporte nutrimental, la lenteja contiene compuestos bioactivos como polifenoles, flavonoides y taninos condensados, los cuales presentan capacidad antioxidante (Xu y Chang, 2007). Estos compuestos pueden contribuir a la estabilidad oxidativa de las formulaciones; no obstante, algunos metabolitos secundarios también pueden comportarse como factores antinutricionales dependiendo de la concentración y procesamiento aplicado.

El haba y el garbanzo, por su parte, presentan características nutrimentales complementarias que favorecen su consideración como ingredientes potenciales en la alimentación animal. El haba (Vicia faba) contiene entre 24 y 32 % de proteína y aproximadamente 35–50 % de almidón, dependiendo de la variedad y las condiciones de cultivo (Martineau-Côté et al., 2022). El garbanzo (*Cicer arietinum*) presenta contenidos de proteína cercanos a 18–25 %, además de una mayor proporción lipídica en comparación con otras legumbres (entre 4 y 7 %), contribuyendo al aporte energético de las formulaciones (Saperas et al., 2023). Así mismo, el garbanzo contiene entre 50 y 60 % de carbohidratos totales y cantidades importantes de fibra dietética, características que pueden influir favorablemente en propiedades tecno-funcionales de los alimentos procesados. Aunque también posee compuestos antinutricionales como ácido fítico, vicina, convicina e inhibidores de tripsina (Martineau-Côté et al., 2022).

El uso de legumbres en alimentación animal requiere considerar la presencia de compuestos capaces de interferir con el aprovechamiento nutrimental de proteínas y minerales (antinutricios). Entre los principales metabolitos identificados en estas matrices se encuentran fitatos, taninos condensados, inhibidores de proteasas y oligosacáridos no digeribles, cuya concentración puede variar dependiendo de la especie vegetal, variedad y condiciones de cultivo. Estos compuestos pueden modificar la digestibilidad proteica, disminuir la biodisponibilidad de minerales como hierro y zinc, o generar alteraciones digestivas en algunas especies monogástricas cuando se incorporan en altas proporciones dentro de la dieta (Martineau-Côté et al., 2022; Xu y Chang, 2007). Debido a ello, el procesamiento tecnológico es importante para incrementar el valor nutricional de las legumbres destinadas a alimentación animal. Tratamientos como imbibición, cocción, fermentación, germinación y extrusión favorecen la reducción de compuestos antinutricionales y mejoran la digestibilidad de proteínas y carbohidratos (Saperas et al., 2023). Particularmente, procesos previos como la imbibición o remojo permiten la hidratación de la semilla, favoreciendo el ablandamiento de estructuras celulares y la difusión parcial de compuestos solubles y algunos metabolitos antinutricionales hacia el medio acuoso. Este tratamiento puede contribuir a disminuir parcialmente oligosacáridos no digeribles, taninos y fitatos, además de facilitar etapas posteriores de procesamiento. Por su parte, la extrusión induce gelatinización del almidón, desnaturalización parcial de proteínas y disminución de inhibidores enzimáticos, además de modificar propiedades funcionales como absorción y solubilidad en agua, características relevantes durante la elaboración de alimentos balanceados (Saperas et al., 2023).

En la formulación de alimentos, las propiedades tecno-funcionales son importantes, entre algunas de ellas destaca: el índice de absorción de agua (IAA), se relaciona con la capacidad de una harina para retener agua y formar estructuras hidratadas, mientras que el índice de solubilidad en agua (ISA) indica la cantidad de sólidos solubles liberados al medio acuoso. Estas propiedades dependen de la composición química de cada legumbre, particularmente del contenido de proteínas, almidón y fibra. Harinas con mayor contenido de compuestos hidrofílicos suelen presentar mayor capacidad de absorción de agua, característica relevante durante procesos de peletizado y extrusión. Por otra parte, una mayor solubilidad puede favorecer la dispersión de componentes y modificar la textura de las formulaciones destinadas a animales no humanos.

Diversos estudios han evaluado el uso de legumbres como sustitutos parciales de harina de soya en alimentación animal. La harina de soya constituye actualmente una de las principales fuentes proteicas utilizadas en formulaciones para aves, porcinos, bovinos, peces y animales de compañía debido a su elevado contenido de proteína (entre 44 y 48 %), además de su adecuada digestibilidad y perfil de aminoácidos esenciales (Cruz-Castro et al., 2011). En alimentación animal no humana, la soya suele suministrarse principalmente en forma de harina desgrasada obtenida después de la extracción de aceite, aunque también puede utilizarse como soya integral tostada, concentrados proteicos o aislados proteicos dependiendo de la especie animal y del objetivo nutricional (Cruz-Castro et al., 2011; Stein et al., 2008). La harina de soya constituye la principal fuente proteica en formulaciones para aves y porcinos debido a su elevado contenido de proteína y adecuada digestibilidad de aminoácidos esenciales (Stein et al., 2008). En rumiantes, la soya puede emplearse tanto como fuente de proteína degradable en rumen como proteína de sobrepaso, dependiendo del tratamiento térmico aplicado durante su procesamiento, el cual modifica la degradabilidad ruminal de las proteínas (NRC, 2001).

No obstante, la elevada dependencia mundial de la soya ha generado preocupaciones relacionadas con sostenibilidad ambiental, deforestación, volatilidad económica y competencia con la alimentación humana, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes proteicas alternativas (Pendrill et al., 2019). En este contexto, diferentes legumbres han sido evaluadas como ingredientes potenciales en alimentación de animales no humanos. David et al. (2024) señalaron que legumbres de grano como haba, chícharo, lupino y garbanzo pueden incorporarse en dietas para aves y porcinos siempre que se considere el balance de aminoácidos, digestibilidad y contenido de factores antinutricionales.

El chícharo (*Pisum sativum*) destaca como ingrediente proteico en alimentación de aves y cerdos debido a su contenido de proteína, energía metabolizable y almidón altamente digestible. Por su parte, el lupino (*Lupinus* spp.) ha sido utilizado en alimentación de rumiantes, aves y acuicultura por su alto contenido en proteínas, aunque requiere control de alcaloides y fibra dependiendo de la especie vegetal (Gómez-Izquierdo et al., 2020). Por otra parte, diferentes investigaciones han evaluado el uso de haba y garbanzo en dietas para aves de engorda y porcinos con resultados favorables cuando se emplean niveles adecuados de inclusión y tratamientos tecnológicos para disminuir compuestos antinutricionales. Estudios realizados en pollos de engorda han reportado que el haba puede incorporarse parcialmente en sustitución de harina de soya sin afectar significativamente parámetros productivos cuando se utilizan variedades con bajo contenido de taninos o tratamientos térmicos adecuados (Crépon et al., 2010). De igual manera, el garbanzo ha mostrado potencial en alimentación de porcinos y aves debido a su contenido de proteína y energía metabolizable, particularmente cuando se aplican procesos como cocción o extrusión para mejorar la digestibilidad y reducir factores antinutricionales (Gómez-Izquierdo et al., 2020).

En rumiantes, las asociaciones gramíneas-legumbres pueden mejorar el valor nutritivo de los forrajes además de favorecer a los sistemas de producción más sostenibles. Las gramíneas aportan principalmente carbohidratos estructurales y energía, mientras que las legumbres incrementan el contenido proteico de la dieta, mejoran la digestibilidad y contribuyen al equilibrio nutricional del forraje (Pincay-Ganchozo et al., 2025). La incorporación de leguminosas forrajeras puede elevar significativamente el contenido de proteína cruda del sistema forrajero, alcanzando valores cercanos a 15–25 %, dependiendo de la especie vegetal, manejo agronómico y estado fisiológico del cultivo. Además del aporte proteico, las legumbres presentan una menor proporción de fibra detergente

neutra en comparación con las gramíneas tropicales, favoreciendo una mayor digestibilidad y consumo voluntario por parte de los animales (Demment & Van Soest, 1985). Pincay-Ganchozo et al. (2025) señalaron que la combinación de gramíneas y legumbres mejora la utilización de nutrientes debido a la complementariedad entre energía fermentable y nitrógeno disponible para la microbiota ruminal, lo que favorece procesos de fermentación y síntesis de proteína microbiana.

Otro aspecto importante en referencia a las legumbres corresponde a la fijación de nitrógeno al suelo. Las legumbres establecen asociaciones simbióticas con bacterias del género Rhizobium, capaces de transformar nitrógeno atmosférico en formas asimilables para la planta. Este proceso puede aportar entre 50 y 300 kg de nitrógeno por hectárea al año, dependiendo de la especie y condiciones de cultivo (Peoples et al., 2009). Como consecuencia, disminuye la necesidad de fertilizantes nitrogenados sintéticos y se favorece la sostenibilidad de los sistemas pecuarios. Así, las asociaciones gramíneas-legumbres pueden mejorar las características físicas y biológicas del suelo, incrementando el contenido de materia orgánica, actividad microbiana y capacidad de retención de agua (FAO, 2016).

Desde el punto de vista productivo, diferentes investigaciones han reportado incrementos en ganancia de peso y producción de leche cuando se utilizan sistemas forrajeros mixtos con presencia de legumbres, debido a una mejora en la calidad nutricional y disponibilidad proteica de la dieta (Demment, M. W., & Van Soest, 1985; Lüscher et al., 2014). En términos ambientales, el uso de asociaciones forrajeras mixtas contribuye a reducir parcialmente las emisiones asociadas con fertilización nitrogenada y favorece sistemas de producción más resilientes frente a condiciones climáticas variables. Por ello, la incorporación de legumbres en sistemas de alimentación de rumiantes además de ser una estrategia nutricional también es una alternativa alineada con modelos agropecuarios sostenibles y con los principios de producción responsable.

En este contexto, la lenteja es una alternativa particularmente interesante debido a su combinación de proteína, fibra y compuestos funcionales. Además de aportar proteínas (20–30 %), contiene compuestos fenólicos y carbohidratos fermentables que pueden contribuir a propiedades funcionales y tecnológicas importantes durante la formulación de alimentos destinados a animales no humanos (Saperas et al., 2023). Desde una perspectiva ambiental, las legumbres se sitúan entonces como cultivos estratégicos debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con bacterias del género Rhizobium, disminuyendo la necesidad de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Vance et al., 2000). Esta característica contribuye a reducir el impacto ambiental asociado con la producción agrícola y favorece sistemas agroalimentarios más sostenibles.

El aprovechamiento de lenteja, haba y garbanzo en alimentación animal se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 2 relacionado con hambre cero y agricultura sostenible, así como con el ODS 12 enfocado en producción y consumo responsables. De tal forma que la diversificación de fuentes proteicas puede fortalecer la sostenibilidad de los sistemas pecuarios y reducir la dependencia de ingredientes convencionales.

PARTE EXPERIMENTAL

Material de estudio. El material de estudio consistió en semillas de lenteja verde (*Lens culinaris* M.), haba (*Vicia faba* L.) y garbanzo (*Cicer arietinum*). Las muestras fueron adquiridas en un mercado local de Morelia, Michoacán, México. Se formaron tres lotes de 500 g correspondientes a cada legumbre. Las semillas fueron seleccionadas considerando que estuvieran sanas, enteras y libres de impurezas, restos de insectos, polvo y fragmentos vegetales.

Caracterización del material de estudio. Las legumbres se caracterizaron físicamente mediante la determinación de tamaño, peso hectolítrico, color y peso de la semilla. Para el análisis de tamaño se midieron longitud, ancho y diámetro ecuatorial en 25 semillas seleccionadas al azar utilizando un vernier. El peso hectolítrico se determinó de acuerdo con la metodología 55-10 de la AOAC (2005). El peso de la semilla se evaluó mediante el pesaje de 100 granos seleccionados aleatoriamente. Las determinaciones se realizaron por triplicado. La determinación de color se realizó utilizando un

colorímetro HunterLab®, obteniendo los parámetros de luminosidad (L*) y coordenadas cromáticas a* y b*. A partir de estos valores se calcularon el ángulo de matiz (AM) y el índice de saturación (IS).

Producción de harina y análisis químico proximal. Posteriormente, las legumbres fueron molidas utilizando un molino Goldenwall® hasta obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 0.25 mm. Las harinas se utilizaron para la determinación de composición química proximal y las propiedades tecno-funcionales. La composición química proximal se realizó mediante metodologías oficiales AOAC (2005), determinando humedad, cenizas, extracto etéreo, proteína y fibra cruda.

Propiedades tecno-funcionales. Las propiedades tecno-funcionales fueron el índice de absorción de agua (IAA) y el índice de solubilidad en agua (ISA). Para el IAA, se suspendieron 2.5 g de muestra en 30 mL de agua a 30 °C con agitación intermitente durante 30 minutos. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas durante 10 minutos a 3000 rpm y se pesó el gel obtenido. El ISA se determinó utilizando los sólidos solubles presentes en el sobrenadante obtenido durante la evaluación del IAA.

Diseño experimetal. El diseño experimental fue un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados fueron analizados mediante análisis de varianza y prueba de Tukey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$ utilizando el paquete estadístico JMP®.

RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan las características físicas determinadas en lenteja (*Lens culinaris* M.), garbanzo (*Cicer arietinum*) y haba (*Vicia faba* L.). Los resultados en peso hectolítrico, tamaño de semilla y parámetros cromáticos evidenciaron diferencias significativas entre las legumbres analizadas, estas diferencias están relacionadas con las características morfológicas y estructurales propias de cada especie.

Tabla 1. Características físicas de las semillas de lenteja, garbanzo y haba.

Propiedad física	**Lenteja**	**Garbanzo**	**Haba**
Peso hectolítrico (kg/hL)	86 ±0.01	82 ±0.01	66 ±0.01
Peso de 100 semillas (g)	2.79 ±0.04	66.90 ±2.03	141.5 ±1.60
Longitud (mm)	2.04 ±0.42	9.61 ±1.05	19.51 ±2.99
Ángulo de matiz (AM)	78.92 ±0.84	68.62 ±0.36	68.74 ±0.82
Índice de saturación (IS)	27.38 ±1.91	13.59 ±0.42	13.25 ±0.11

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí de acuerdo con Tukey (α=0.05 ± Desviación estándar

La lenteja y el garbanzo presentaron los mayores valores de peso hectolítrico (86 y 82 kg/hL, respectivamente), mientras que el haba mostró el valor más bajo (66 kg/hL). El peso hectolítrico es un parámetro asociado con la densidad y sanidad física de las semillas, valores elevados sugieren menor proporción de semillas dañadas o material extraño. De acuerdo con Hall et al. (2017), las diferencias en densidad y tamaño entre legumbres están influenciadas por el genotipo, condiciones ambientales y prácticas agronómicas. Las semillas de haba obtuvieron el mayor peso de 100 semillas (141.5 g), seguido del garbanzo (66.9 g), mientras que la lenteja mostró el menor valor (2.79 g). Estas diferencias morfológicas pueden influir en procesos tecnológicos como hidratación, velocidad de cocción y eficiencia de molienda. Estudios realizados por Wang et al. (2009) indicaron que el tamaño de la semilla afecta directamente la capacidad de absorción de agua y las propiedades funcionales de las harinas derivadas de las legumbres.

En referencia a los parámetros de color, la lenteja tuvo el mayor índice de saturación (27.38) y el mayor ángulo de matiz (78.92), indicando tonalidades café-verdosas más intensas respecto a garbanzo y haba. Estas diferencias pueden relacionarse con la presencia de compuestos fenólicos

y pigmentos presentes en la cubierta seminal, los cuales también participan en propiedades antioxidantes y estabilidad oxidativa de las harinas (Xu y Chang, 2007).

En la Tabla 2 se presenta la composición química proximal de las harinas obtenidas a partir de las semillas de lenteja, garbanzo y haba. Los resultados mostraron diferencias importantes en proteína, fibra cruda, extracto etéreo y cenizas, características que son importantes para su uso en formulaciones destinadas a alimentación animal de especies no humanas.

Tabla 2. Composición química proximal de las semillas de lenteja, garbanzo y haba.

Parámetro	**Lenteja**	**Garbanzo**	**Haba**
Humedad (%)	8.49 ±0.10	7.18 ±0.04	8.76 ±0.17
Extracto etéreo (%)	1.56 ±0.08	5.08 ±0.31	1.93 ±0.18
Fibra cruda (%)	10.92 ±0.15	4.80 ±0.39	3.00 ±0.13
Proteína (%)	30.62 ±1.85	22.74 ±0.08	26.37 ±0.79
Cenizas (%)	2.80 ±0.06	3.36 ±0.06	3.40 ±0.13
pH	6.46 ±0.28	6.43 ±0.03	6.43 ±0.01

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí de acuerdo a Tukey (α=0.05 ± Desviación estándar.

La lenteja presentó el mayor contenido de proteína (30.62 %), seguida de haba (26.37 %) y garbanzo (22.74 %). Estos resultados coinciden con lo reportado por Saperas et al. (2023), quienes señalaron que las legumbres poseen concentraciones proteicas entre 20 y 30 %, dependiendo de la especie y condiciones de cultivo. El elevado contenido proteico de la lenteja representa una ventaja importante para su utilización en alimentación animal, especialmente como alternativa parcial a ingredientes convencionales como harina de soya.

La Figura 1 muestra comparativamente el contenido de proteína y fibra cruda en las semillas de legumbres evaluadas. Se observa que la lenteja destacó por presentar la mayor concentración de proteína y fibra.

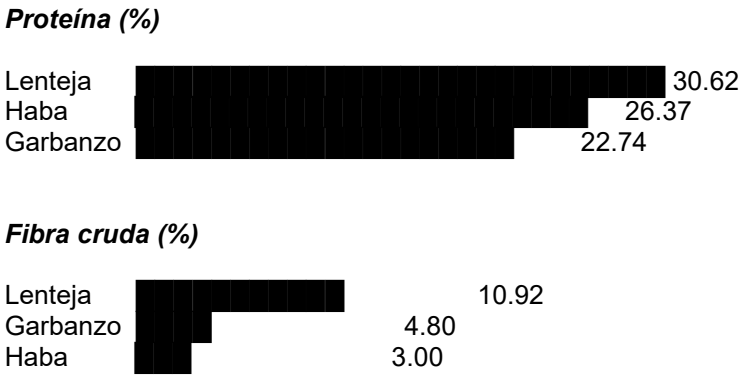


Figura 1. Contenido de proteína y fibra cruda en semillas de lenteja, garbanzo y haba

El contenido de fibra cruda fue significativamente mayor en lenteja (10.92 %) comparado con garbanzo (4.80 %) y haba (3.00 %). Hall et al. (2017) reportaron que las legumbres contienen cantidades importantes de fibra soluble e insoluble, contribuyendo a procesos digestivos y fermentativos. En alimentación animal no humana, la fibra puede ejercer efectos benéficos sobre la microbiota intestinal y el tránsito digestivo; sin embargo, niveles elevados pueden disminuir parcialmente la digestibilidad en especies monogástricas cuando las inclusiones son excesivas.

El extracto etéreo fue significativamente mayor en garbanzo (5.08 %) respecto a lenteja (1.56 %) y haba (1.93 %). Este comportamiento coincide con lo descrito por Oishi et al. (2024), quienes indicaron que el garbanzo posee una mayor proporción de lípidos respecto a otras legumbres, predominando los ácidos grasos insaturados, particularmente ácido linoleico. El mayor contenido energético derivado de los lípidos puede representar una ventaja en formulaciones destinadas a aves y porcinos.

En relación con las cenizas, las semillas de haba y garbanzo presentaron los valores más altos (3.40 y 3.36 %, respectivamente), mientras que la lenteja mostró el menor contenido mineral (2.80 %). Cabe hacer mención que el contenido de cenizas representa indirectamente la concentración total de minerales presentes en las legumbres, incluyendo hierro, zinc, calcio y magnesio. Hall et al. (2017) señalaron que las legumbres constituyen una fuente importante de minerales esenciales y que su composición mineral depende tanto del genotipo como de las condiciones edafoclimáticas.

En la Tabla 3 se presentan las propiedades tecno-funcionales determinadas para las harinas de lenteja, garbanzo y haba. Estos parámetros son importantes ya que permiten predecir el comportamiento de las harinas durante la elaboración de alimentos para animales no humanos, especialmente en operaciones como hidratación, mezclado, peletizado y extrusión. Tecnológicamente, la interacción de las harinas con el agua influye en la formación de masas, la cohesión del alimento, la estabilidad del pellet y la facilidad de manejo durante el procesamiento. En alimentos peletizados, una buena calidad física puede disminuir la generación de finos, reducir segregación de ingredientes y mejorar la palatabilidad y consumo del alimento (Jukanti et al., 2012; Thomas et al., 2020).

Tabla 3. Propiedades tecno-funcionales de las harinas de lenteja, garbanzo y haba

Propiedad	**Lenteja**	**Garbanzo**	**Haba**
Índice de absorción de agua (IAA)	0.016 ±0.07	0.68 ±0.03	0.15 ±0.01
Índice de solubilidad en agua (ISA)	2.46	2.25	2.39
pH	6.46	6.43	6.43

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes entre sí de acuerdo con Tukey (α=0.05 ± Desviación estándar.

El índice de absorción de agua (IAA) fue mayor en garbanzo (0.68) respecto a haba (0.15) y lenteja (0.016). Este parámetro se relaciona con la capacidad de los componentes de la harina, principalmente almidón, proteínas y fibra, para hidratarse y retener agua. Químicamente, el IAA puede interpretarse como un indicador indirecto del grado de gelatinización del almidón y de la capacidad de hinchamiento de los gránulos durante tratamientos con agua y calor; por ello, se ha utilizado para describir el grado de cocción o reconstitución de harinas y productos extrudidos (Singh et al., 2007). En alimentos para animales, esta propiedad es importante porque una harina con mayor capacidad de absorción puede contribuir a la formación de una matriz más hidratada y cohesiva durante el mezclado y el procesamiento térmico, favoreciendo la compactación y estabilidad física del alimento.

La mayor absorción de agua observada en garbanzo puede ser útil en formulaciones donde se requiere mejorar la hidratación, cohesión y estructura del alimento, por ejemplo, en dietas peletizadas o extrudidas. En procesos de peletizado, la combinación de humedad, calor y presión favorece cambios en almidones y proteínas que contribuyen a la unión entre partículas; la literatura sobre manufactura de alimentos balanceados señala que la gelatinización del almidón participa en las propiedades de unión y durabilidad de los pellets (Abdollahi, 2012; Thomas et al., 2020). No obstante, un IAA alto debe interpretarse de acuerdo con la formulación completa, ya que un exceso de absorción puede modificar la viscosidad de la mezcla y afectar el flujo del material durante el procesamiento.

Por otra parte, el índice de solubilidad en agua (ISA) presentó el valor más alto en lenteja (2.46), seguido de haba (2.39) y garbanzo (2.25). Este parámetro expresa la proporción de sólidos solubles liberados al medio acuoso y se relaciona con la presencia de fracciones solubles de proteínas, carbohidratos, fibra soluble y productos de modificación del almidón. En productos extrudidos, el ISA se ha utilizado para estimar cambios en la solubilización de componentes derivados del procesamiento, especialmente cuando ocurren dextrinización del almidón, desnaturalización proteica o liberación de sólidos solubles (Oikonomou y Krokida, 2012; Singh et al., 2007).

En términos de alimentación animal, el ISA nfluye en la dispersión de la harina dentro de la mezcla, la velocidad de hidratación y la disponibilidad de fracciones solubles durante el consumo y digestión. En dietas para especies monogástricas, como aves y porcinos, una adecuada solubilidad puede favorecer la interacción del alimento con los fluidos digestivos; sin embargo, no debe interpretarse de manera aislada como mayor digestibilidad, ya que esta depende también del perfil de aminoácidos, estructura del almidón, contenido de fibra y presencia de factores antinutricionales. En alimentos extrudidos para especies acuícolas, la solubilidad en agua también es un parámetro crítico porque puede relacionarse con pérdidas de nutrientes al medio acuático; por ello, en ese tipo de alimentos se busca un equilibrio entre estabilidad en agua y disponibilidad digestiva (Glencross et al., 2007).

Las propiedades tecno-funcionales también influyen fuertemente en propiedades como palatabilidad, facilidad de aprehensión, textura, dureza, generación de polvo y aceptación del alimento. Los alimentos peletizados con buena estabilidad física tienden a reducir la segregación de ingredientes, disminuir desperdicio y favorecer un consumo más uniforme; las guías de peletizado para alimento porcino describen beneficios como mejor palatabilidad, mayor fluidez del alimento, menor desperdicio y menor separación de ingredientes (Vukmirović et al., 2017). En este sentido, las diferencias observadas en IAA e ISA pueden incidir en la textura final del alimento, en su comportamiento durante almacenamiento y en su aceptación por parte de las especies.

El pH de las harinas fue similar entre las tres legumbres, con valores cercanos a la neutralidad: lenteja 6.46, garbanzo 6.43 y haba 6.43. Estos valores sugieren matrices ligeramente ácidas, condición que puede influir en la solubilidad proteica, estabilidad de componentes y comportamiento durante el procesamiento. En harinas vegetales, el pH puede modificar la carga eléctrica de las proteínas y, por lo tanto, afectar propiedades como hidratación, dispersión y formación de estructuras. En la formulación de alimentos para animales, estos valores no representan por sí mismos una limitante tecnológica, pero sí son útiles para caracterizar la matriz y prever su interacción con otros ingredientes.

Con base en estos resultados, el garbanzo mostró mayor capacidad de absorción de agua, lo que puede ser una ventaja cuando se busca mayor hidratación y cohesión en la matriz alimentaria. La lenteja, por su parte, presentó mayor solubilidad en agua, característica que favorece la dispersión de componentes durante la formulación, en tanto que el haba mostró un comportamiento intermedio en ambas propiedades. Por lo tanto, desde el punto de vista tecnológico, químico y de aceptación del alimento, las tres harinas presentan atributos diferenciados que podrían aprovecharse en formulaciones específicas para animales no humanos, siempre considerando la especie, el tipo de proceso aplicado y el nivel de inclusión en la dieta.

CONCLUSIONES

Las legumbres evaluadas son una alternativa proteica para incorporarse parcialmente en la alimentación de animales no humanos debido a su aporte nutrimental y propiedades tecno-funcionales. La lenteja destacó como la matriz con mayor potencial por su equilibrio entre contenido proteico, fibra y funcionalidad tecnológica, características que favorecen su aplicación en formulaciones alimenticias. La incorporación de lenteja, haba y garbanzo puede contribuir a disminuir la dependencia de fuentes proteicas convencionales como la harina de soya, favoreciendo sistemas pecuarios más sostenibles y diversificados. No obstante, su uso requiere considerar aspectos

relacionados con digestibilidad, presencia de compuestos antinutricionales y procesamiento tecnológico para optimizar su aprovechamiento nutricional.

El uso de legumbres en alimentación animal no humana representa una alternativa alineada con modelos de producción más sostenibles, fortalecimiento de cadenas agroalimentarias locales y aprovechamiento responsable de recursos agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdollahi, M. R., Ravindran, V., Wester, T. J., Ravindran, G., & Thomas, D. V. (2012). Effect of improved pellet quality from the addition of a pellet binder and/or moisture to a wheat-based diet conditioned at two different temperatures on performance, apparent metabolizable energy and ileal nutrient digestibility in broilers. Animal Feed Science and Technology, 175(3–4), 150–157. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001
2. AOCS Press. (2008). Soybeans: Chemistry, production, processing, and utilization. Urbana, IL: AOCS Press.
3. Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2005). Official methods of analysis (18th ed.). Gaithersburg, MD: AOAC International.
4. Crépon, K., Marget, P., Peyronnet, C., Carrouée, B., Arese, P., & Duc, G. (2010). Nutritional value of faba bean (Vicia faba L.) seeds for feed and food. Field Crops Research, 115(3), 329–339. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.09.016
5. Cruz Castro, Carlos Agustín, Hernández Hernández, Luis Héctor, Fernández Araiza, Mario Alfredo, Ramírez Pérez, Teresa, & Angeles López, Omar. (2011). Effects of diets with soybean meal on the growth, digestibility, Phosphorus and Nitrogen excretion of juvenile rainbow trout Oncorhynchus mykiss. Hidrobiológica, 21(2), 118-125. Recuperado en 26 de mayo de 2026, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972011000200002&lng=es&tlng=.
6. David, L. S., Nalle, C. L., Abdollahi, M. R., & Ravindran, V. (2024). Feeding value of lupins, field peas, faba beans and chickpeas for poultry: An overview. Animals, 14(4), 619. https://doi.org/10.3390/ani14040619
7. Demment, M. W., & Van Soest, P. J. (1985). A nutritional explanation for body-size patterns of ruminant and nonruminant herbivores. The American Naturalist, 125(5), 641–672. https://doi.org/10.1086/284369
8. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). The power of pulses: Nourishing people, animals and the environment. Recuperado de Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024).
9. Glencross, B. D., Booth, M., & Allan, G. L. (2007). A feed is only as good as its ingredients—A review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds. Aquaculture Nutrition, 13(1), 17–34. https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2007.00450.x
10. Gómez Izquierdo, E., Gómez Raya, L., García Cortes, L. A., Ciruelos Pellón, J. J., Mercado de la Peña, E. de, Martin Diana, A. B., Martín Pedrosa, M., & Rauw, W. M. (2020). Uso de legumbres autóctonas en nutrición porcina. SUIS: Porcicultura Profesional, 169, 12–18.
11. Hall, C., Hillen, C., & Garden Robinson, J. (2017). Composition, nutritional value, and health benefits of pulses. Cereal Chemistry, 94(1), 11–31. https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-16-0069-FI
12. Jukanti, A. K., Gaur, P. M., Gowda, C. L. L., & Chibbar, R. N. (2012). Nutritional quality and health benefits of chickpea (Cicer arietinum L.): A review. British Journal of Nutrition, 108(S1), S11–S26. https://doi.org/10.1017/S0007114512000797
13. Liberal, A., Almeida, D., Fernandes, Â., Pereira, C., Ferreira, I. C. F. R., Vivar-Quintana, A. M., & Barros, L. (2023). Nutritional, chemical and antioxidant evaluation of Armuña lentil (Lens culinaris spp): Influence of season and soil. Food Chemistry, 411, 135491. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135491
14. Lüscher, A., Mueller-Harvey, I., Soussana, J. F., Rees, R. M., & Peyraud, J. L. (2014). Potential of legume-based grassland–livestock systems in Europe: A review. Grass and Forage Science, 69(2), 206–228. https://doi.org/10.1111/gfs.12124

15. Martineau-Côté, D., Achouri, A., Karboune, S., & L'Hocine, L. (2022). Faba bean: An untapped source of quality plant proteins and bioactive compounds. Nutrients, 14(7), 1542. DOI: 10.3390/nu14081541
16. National Research Council (NRC). (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev. ed.). Washington, DC: National Academy Press. https://nap.nationalacademies.org/catalog/9825/nutrient-requirements-of-dairy-cattle-seventh-revised-edition-2001
17. Oishi, S., Yoshioka, Y., Dohra, H., & Miyoshi, N. (2024). Chickpea proteins are potential sources of bioactive peptides that induce glucose uptake via AMP-activated protein kinase. Food Bioscience, 59, 104029. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104029
18. Oikonomou, N. A., & Krokida, M. K. (2012). Water absorption index and water solubility index prediction as a function of extrusion conditions in expanded products. International Journal of Food Properties, 15(1), 199–217. https://doi.org/10.1080/10942911003754718
19. Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., & Kastner, T. (2019). Deforestation displaced: Trade in forest-risk commodities and the prospects for a global forest transition. Environmental Research Letters, 14(5), 055003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab0d41
20. Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F. et al. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. Symbiosis 48, 1–17 (2009). https://doi.org/10.1007/BF03179980
21. Pincay-Ganchozo, R., Luna-Murillo, R., Molina-Hidrovo, C., & Carrillo-Zenteno, M. (2025). Producción de asociaciones de gramíneas y leguminosas forrajeras tratadas con inoculantes bacterianos (Azotobacter spp. y Pseudomonas fluorescens). Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, 41(2), 344–356. https://doi.org/10.29393/CHJAAS41-31LERI40031
22. Saperas, M., Díez, M., Martín-Gómez, H., Rivera, A., Ortiz, J., Abadias, M., & Aguiló-Aguayo, I. (2023). Las legumbres como ingrediente potencial para el sector agroalimentario. Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://chilorg.chil.me/download-doc/452072
23. Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: A review. International Journal of Food Science & Technology, 42(8), 916–929. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x
24. Stein, H. H., Berger, L. L., Drackley, J. K., Fahey, G. C., Hernot, D. C., & Parsons, C. M. (2008). Nutritional properties and feeding values of soybeans and their coproducts. En L. A. Johnson, P. J. White, & R. Galloway (Eds.), Soybeans: Chemistry, production, processing, and utilization (pp. 613–660). Urbana, IL: AOCS Press. https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-64-6.50021-4
25. Thomas, M., van Zuilichem, D. J., & van der Poel, A. F. B. (1997). Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. Animal Feed Science and Technology, 64(2–4), 173–192. https://doi.org/10.1016/S0377-8401(96)01058-9
26. Vance, C. P., Graham, P. H., & Allan, D. L. (2000). Biological nitrogen fixation: Phosphorus—A critical future need? En F. O. Pedrosa, M. Hungria, M. G. Yates, & W. E. Newton (Eds.), Nitrogen fixation: From molecules to crop productivity (pp. 509–514). Dordrecht, Netherlands: Springer/Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-306-47615-0_291
27. Vukmirović, Đ., Čolović, R., Rakita, S., Brlek, T., Đuragić, O., & Solà-Oriol, D. (2017). Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition—A review. Animal Feed Science and Technology, 233, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016
28. Wang, N., Hatcher, D. W., Tyler, R. T., Toews, R., & Gawalko, E. J. (2009). Effect of cooking on the composition of beans (Phaseolus vulgaris L.) and chickpeas (Cicer arietinum L.). Food Research International, 43(2), 589–594. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.012
29. Xu, B., & Chang, S. K. C. (2007). A comparative study on phenolic profiles and antioxidant activities of legumes as affected by extraction solvents. Journal of Food Science, 72(2), S159–S166. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00260.x

ECOGRAFÍA REPRODUCTIVA EN CINCO TAXONES DE SERPIENTES HEMBRAS

Morales Evangelista CL. [1,2*], Cardenas Huerta D [1,2], Flores Mendoza J, Robles Robles JM[1], Cruz Aviña JR.[1], Utrera Quintana F.[1], Vázquez Armijo JF.[3] y Baez Parada JR.[1]

[1]Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
[2] REPROSCAN. [3]Centro Universitario Temascaltepec, UAEMEX.
*leticia.moralesev@correo.buap.mx

RESUMEN

La ecografía es considerada una herramienta no invasiva para la evaluación comparativa de la morfología interna reproductiva. Existen varias especies de serpientes como: la serpiente sorda mexicana (*Pituophis deppei*), el boa constrictor (*Boa constrictor*), la serpiente rey de California (*Lampropeltis californiae*), la serpiente falsa coralillo (*Lampropeltis triangulum*) y la pitón bola (*Python regius*). En este estudio se evalúa la foliculogénesis de las serpientes, por medio de ecografía para investigar las diferencias entre especies, además, de promover el bienestar animal. Se comparó, la presencia, número, tamaño y aspecto ecográfico de los folículos de las diferentes especies mediante ultrasonido. Para el estudio, se empleó un equipo de ultrasonido portátil Mindray DP10Vet con un transductor microconvexo. Se aplicó gel transductor sobre las escamas de cada serpiente en la región celómica, realizando la exploración con planos longitudinales y transversales. Los hallazgos de ecogenicidad revelaron que los folículos de la mayoría de los taxones fueron anecoicos, con la excepción de *Lampropeltis triangulum*, que mostró una capa ecogénica visible. En cuanto al tamaño folicular, se observaron las siguientes medidas: *Pituophis deppei* (0.9cm), *Boa constrictor* (0.84cm), *Lampropeltis triangulum* (0.64cm), *Lampropeltis californiae* (0.24cm) y *Python regius* (0.79cm). La forma folicular fue redonda en la mayoría de las especies. Además, *Pituophis deppei*, *Boa constrictor* y *Python regius* presentaron muchos folículos, mientras que *Lampropeltis triangulum* mostró un número moderado y *Lampropeltis californiae* muy pocos. La ecografía demostró ser una herramienta eficaz y no invasiva para la evaluación reproductiva de serpientes. El patrón folicular anecoico se interpreta como fase basal previtelogénica (período de reposo folicular). Las variaciones observadas, como el menor tamaño en el ejemplar juvenil *L. californiae*, coinciden con la correlación entre madurez y tamaño. La forma folicular redondeada es constante en el estudio. El documento concluye que la ecografía es una herramienta eficaz y no invasiva para la evaluación reproductiva en serpientes, y que la interpretación de los hallazgos foliculares debe considerar la edad y el estado de madurez de cada taxón.

INTRODUCCIÓN

El estudio y manejo de serpientes, tanto en vida silvestre como en cautiverio, requiere de métodos precisos y no invasivos para la evaluación de su estado reproductivo. Entre las diversas especies de interés herpetológico, se destacan por sus particularidades morfológicas y reproductivas la serpiente sorda mexicana (*Pituophis deppei*), la boa constrictor (*Boa constrictor*), la serpiente rey de California (*Lampropeltis californiae*), la serpiente falsa coralillo (*Lampropeltis triangulum*) y la pitón bola (*Python regius).* La *Pituophis deppei* es una colúbrida de tamaño grande, conocida por su patrón de coloración distintivo y por producir huevos significativamente más grandes que otras colúbridas mexicanas, lo que influye en su estrategia de inversión maternal de huevos grandes y nidadas pequeñas. La *Boa constrictor* es una serpiente de tamaño mediano a grande, robusta y con patrones de coloración variados, caracterizada por ser ovovivípara y dar a luz crías vivas. Las especies del género *Lampropeltis*, como *L. triangulum y L. californiae*, son colúbridas de tamaño moderado, famosas por sus vibrantes patrones de anillos o bandas y por ser ovíparas. Finalmente, la *Python regius*, una pitón de tamaño pequeño a mediano es popular por su temperamento dócil y su habilidad para enroscarse en una bola cuando se siente amenazada, siendo ovípara como las *Lampropeltis*. Las variaciones en las características foliculares entre estas especies, incluyendo su tamaño, forma

y el proceso de vitelogénesis, presentan un campo de estudio crucial para entender sus ciclos reproductivos (Bryson Jr & Hibbitts, 2017).

La ecografía ha emergido como una herramienta diagnóstica fundamental y no invasiva en la medicina veterinaria, con múltiples aplicaciones potenciales en reptiles, la cual, se considera segura tanto para el paciente como para el personal que la realiza, permitiendo una evaluación detallada del tamaño, posición y estructura de los órganos internos, incluyendo el corazón, hígado, vesícula biliar, riñones, intestino grueso, gónadas y el aparato reproductor (Urbanová & Halán, 2016). En el ámbito reproductivo, la ecografía es idónea para la observación de la funcionalidad y el ciclo reproductivo, así como para el diagnóstico de enfermedades de los órganos reproductores (Urbanová & Halán, 2016). También se utiliza para la determinación del sexo y la evaluación del potencial reproductivo, con una técnica no invasiva y bien tolerada en serpientes conscientes, minimizando el estrés y el riesgo de lesiones (Oliveri *et al.,* 2022). Además, la aplicación de un gel abundante en la piel de la serpiente, supera los artefactos causados por el aire atrapado bajo las escamas, permitiendo una visualización clara de las estructuras celómicas, además, el Doppler color puede ser útil para reconocer claramente los folículos y diferenciar las estructuras vasculares de los folículos pequeños que pueden mimetizarlos (Bertocchi *et al.,* 2021).

Mediante la ecografía, es posible identificar y seguir las diferentes etapas del desarrollo folicular (Oliveri *et al.,* 2022). En las serpientes hembra, la presencia de folículos ováricos u oviductos puede observarse (Vetere *et al.,* 2025). Los folículos no vitelogénicos se presentan como esferas pequeñas, dispersas, anecogénicas (oscuras) u homogéneas hipoecogénicas, además, durante la vitelogénesis, los folículos vitelogénicos consisten en esferas grandes, yuxtapuestas, hiperecogénicas (brillantes y blancas) y heterogéneas (Garcia & Almeida-Santos, 2021). Se ha observado que los folículos anecogénicos, pequeños y redondos, alineados en cadena, se presentan al inicio de la temporada reproductiva, donde, estas estructuras aumentan drásticamente de tamaño y cambian su ecogenicidad a medida que maduran y se desarrollan antes y después de la ovulación (Oliveri *et al.,* 2022). La ecografía también permite la identificación temprana de la regresión folicular o de "slugs" (huevos no fertilizados) (Bertocchi *et al.,* 2021). Es posible caracterizar ecográficamente la actividad folicular, las zonas de visualización y las similitudes reproductivas (Garcia & Almeida-Santos, 2021).

En este estudio, se presenta una evaluación comparativa de la morfología folicular entre 5 taxones diferentes. El objetivo general consistió en evaluar, mediante la ecografía como herramienta no invasiva, la morfología reproductiva y la foliculogénesis en estas cinco especies de serpientes hembra, promoviendo el bienestar animal. Como objetivos específicos, se planteó describir las características ecográficas (tamaño, morfología, número, ecogenicidad y ubicación) de los folículos ováricos en diferentes edades, así como comparar las diferencias, similitudes y las zonas óptimas de visualización ecográfica entre los taxones evaluados. Esta metodología contribuirá no solo al sexado de los animales y la comprensión integral de su fisiología reproductiva, sino también a facilitar programas de manejo y conservación.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo de la fase experimental involucró el análisis de cinco ejemplares hembras del suborden Serpentes mantenidas bajo condiciones controladas de cautiverio doméstico. Los sujetos de estudio exhibieron variaciones intencionales en sus edades cronológicas y longitudes corporales con la finalidad de enriquecer el análisis comparativo. Las especificaciones individuales correspondieron a: un espécimen de una *Lampropeltis californiae* (6 meses, 0.25 m) (Figura 1A); una *Boa constrictor* (4 años, 1.79 m) (Figura 1B); una *Lampropeltis triangulum* (4 años, 0.90 m) (Figura 1C); una *Pituophis deppei* (5 años, 1.84 m) (Figura 1D) y una *Python regius* (2 años, 1.10 m) (Figura 1E). Todos los manejos e inspecciones clínicas se desarrollaron bajo protocolos estrictos de mínima manipulación y sujeción física manual convencional, prescindiendo por completo de agentes anestésicos o sedantes químicos, salvaguardando así la integridad fisiológica y minimizando los índices de estrés de los reptiles.



Figura 1. Características anatómicas y demográficas de los cinco taxones de ofidios hembra incluidos en el estudio comparativo. **(A)** Ejemplar juvenil de serpiente rey de California (*Lampropeltis californiae*) de 6 meses de edad y 0.25 m de longitud total, representando el estadio de menor desarrollo ontogénico del grupo. **(B)** Espécimen adulto de *Boa constrictor* de 4 años de edad, característico boido robusto de estrategia reproductiva ovovivípara. **(C)** Serpiente falsa coralillo (*Lampropeltis triangulum*) de 4 años de edad y 0.90 m de longitud, colúbrida ovípara de talla moderada. **(D)** Serpiente sorda mexicana o cincuate *(Pituophis deppei*) de 5 años de edad y 1.84 m, el ejemplar de mayor envergadura física del estudio, conocido por su particular inversión maternal de huevos de gran volumen. **(E)** Pitón bola (*Python regius*) de 2 años de edad y 1.10 m de longitud, boido ovíparo africano seleccionado por sus particulares ritmos reproductivos.

Para la exploración y captura de datos de imagen se utilizó un sistema de ultrasonido portátil digital Mindray DP10Vet, acoplado a un transductor microconvexo operado en un rango de frecuencia multifrecuencial de 7.5 a 10 MHz. La profundidad de escaneo se calibró de forma dinámica entre los 3 cm y 6 cm de acuerdo con el volumen corporal específico de cada taxón, mientras que los valores de ganancia general se ajustaron dentro de un intervalo de 66 a 110 decibelios para maximizar la resolución de contraste de los ovarios.

El protocolo de abordaje inició con la colocación de gel conductor acústico hidrosoluble sobre la superficie ventral y ventrolateral del celoma de los animales. Esta maniobra técnica es crítica debido a que la morfología de las escamas córneas induce la retención de burbujas de aire microscópicas, las cuales actúan como una barrera de alta impedancia que disipa el haz ultrasónico; el uso masivo de gel elimina dicha interfaz gaseosa y optimiza el acoplamiento acústico. El transductor se posicionó sobre la línea media ventral, realizando desplazamientos progresivos en sentido craneocaudal a través de los tercios medio y posterior de la cavidad celómica. Se efectuaron barridos sistemáticos en planos de corte longitudinal y transversal, registrando de forma estandarizada variables de presencia, morfología geométrica, recuento estimado, dimensiones diametrales en centímetros, ecogenicidad y la ubicación topográfica precisa para cada una de las especies bajo evaluación.

Se han reportado los valores de referencia y patrones ultrasonográficos del estado pre-folicular en diversas familias de ofidios de acuerdo con: (Banzato *et al.,* 2012), (Matayoshi *et al.,* 2018), (Rizzi *et al.,* 2017) y (Gnudi *et al.,* 2009). La matriz compila la ecogenicidad basal, los rangos de diámetro folicular estándar, la geometría anatómica, la densidad numérica esperada y las ventanas topográficas óptimas de exploración para *Pituophis deppei*, *Boa constrictor*, *Lampropeltis* spp. y *Python regius*, sirviendo como marco de validación clínica para el diagnóstico no invasivo del sexo y la actividad gonadal (Cuadro 1)

Cuadro 1: Valores de referencia y patrones ultrasonográficos del estado pre-folicular en diversas familias de ofidios.

	Pituophis deppei	**Boa constrictor**	**Lampropeltis triangulum / californiae**	**Python regius**
Ecogenicidad	Anecoico.	Anecoico.	Ecoico.	Anecoico.
Tamaño Folicular (Diámetro/Largo)	0.8 ± 0.4 cm	0.76 ± 0.42 cm	0.4 ± 0.18 cm	0.7 ± 0.36 cm

Forma	Circular	Circular	Circular	Circular
Número Aproximado de Folículos	Múltiples folículos	Múltiples folículos	Múltiples folículos	Múltiples folículos
Lugar de Visualización	Ventral, Del segundo tercio de la cavidad celómica hacia la cola.	Ventral o lateral, Del segundo tercio de la cavidad celómica hacia la cola.	Ventral, del tercer tercio de la cavidad celómica hacia la cola.	Ventral, Del segundo tercio de la cavidad celómica hacia la cola.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los exámenes ecográficos proporcionaron información valiosa respecto a la caracterización del tracto reproductor de las cinco serpientes estudiadas. Para contextualizar y validar los hallazgos clínicos obtenidos en relación con los reportes bibliográficos de referencia para el estado pre-folicular en reptiles, se estructuró la siguiente matriz de análisis comparativo:

Especie Evaluada	Ecogenicidad Folicular	Tamaño Promedio (cm)	Forma Geométrica	Cantidad Estimada	Lugar de Visualización Celómica
Pituophis deppei	Anecoico	0.90 cm	Redonda / Circular	Abundante (Múltiples)	Segundo tercio de la cavidad hacia la cola
Boa constrictor	Anecoico	0.84 cm	Redonda / Circular	Abundante (Múltiples)	Ventrolateral/Ventral, segundo tercio celómico
Lampropeltis triangulum	Capa Ecogénica Visible	0.64 cm	Redonda / Circular	Moderada	Ventral, tercer tercio de la cavidad hacia la cola
Lampropeltis californiae	Anecoico	0.24 cm	Puntos Diminutos	Escasa (Muy pocos)	Ventral, tercer tercio de la cavidad hacia la cola
Python regius	Anecoico	0.79 cm	Redonda / Circular	Abundante (Múltiples)	Ventral, segundo tercio de la cavidad hacia la cola

Cuadro 2. Matriz comparativa de los hallazgos ecográficos y caracterización folicular *in vivo* de los cinco taxones de serpientes hembra evaluados en el presente estudio. Se detallan los datos específicos recopilados de ecogenicidad tisular, mediciones diametrales exactas en centímetros, morfología geométrica, cuantificación estimada de folículos y su localización anatómica por tercios dentro de la cavidad celómica, evidenciando las variaciones asociadas a la especie, edad y madurez biológica de cada ejemplar consciente.

Los registros de ecogenicidad denotaron que las estructuras foliculares de *Pituophis deppei*, *Boa constrictor*, *Lampropeltis californiae* y *Python regius* se presentaron predominantemente anecoicas, hallazgo que guarda total concordancia con las caracterizaciones de folículos en fase previtelogénica o de reposo reportadas previamente por Banzato (2012). La única variante notable se manifestó en el ejemplar de *Lampropeltis triangulum*, el cual evidenció una demarcación periférica ecogénica claramente visible; este fenómeno sugiere una transición fisiológica hacia una etapa de maduración

vitelogénica más avanzada, donde el depósito inicial de lípidos modifica la impedancia del tejido folicular.

En lo que respecta a la escala volumétrica de los folículos, los diámetros medidos reflejaron una correlación directa con el estado de madurez y la edad de los sujetos. Las dimensiones oscilaron desde un valor mínimo de 0.24 cm en *Lampropeltis californiae* hasta un máximo de 0.90 cm en *Pituophis deppei*. El tamaño sumamente reducido y la morfología en forma de "puntos" documentada en *L. californiae* se explican de forma biológica por su condición de juvenil (6 meses de edad), lo que ratifica lo establecido por Oliveri (2022) sobre la inactividad y escala reducida de las estructuras gonadales en ejemplares pre-púberes.

La configuración geométrica predominante fue circular y simétrica para la mayoría de los taxones maduros, validando las descripciones herpetológicas de Rizzi (2017). En el plano numérico, *P. deppei*, *B. constrictor* y *P. regius* presentaron una densidad folicular abundante organizada en series lineales, mientras que *L. triangulum* exhibió una cantidad moderada y *L. californiae* un patrón escaso, consistente con su estatus de inmadurez sexual.

Topográficamente, los folículos se situaron de manera consistente dentro del segundo tercio celómico en *P. deppei*, *B. constrictor* y *P. regius*. Por el contrario, los miembros del género *Lampropeltis* exhibieron una localización más caudal, proyectándose principalmente sobre el tercer tercio de la cavidad celómica. Esta distribución espacial subraya la importancia de ajustar las ventanas de exploración ecográfica dependiendo de la familia y el género del ofidio inspeccionado. Los resultados recopilados confirman de manera sólida que la ecografía bidimensional en modo B (Figura 2) es un método altamente sensible y eficaz para el sexado y diagnóstico reproductivo en serpientes conscientes, eliminando la necesidad de sedación y aportando datos de alto valor para la gestión zootécnica.

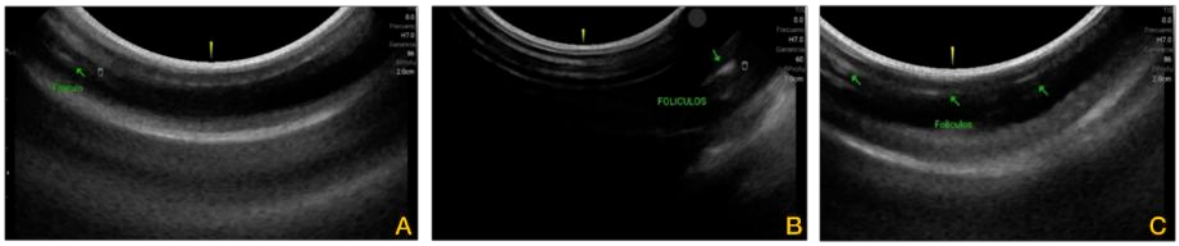


Figura 2. Evaluación ultrasonográfica en modo B de la dinámica de los folículos en ofidios hembra en estadios inmaduros. **(A)** Abordaje ventral en boa constrictor (*Boa constrictor*); la ventana acústica en el segundo tercio celómico revela múltiples folículos incipientes de morfología circular regular y apariencia anecoica homogénea, compatibles con un periodo de reposo folicular. **(B)** Exploración longitudinal en serpiente sorda o cincuate (*Pituophis deppei*); se visualiza una cadena lineal de folículos previtelogénicos que, a pesar de su madurez incompleta, presentan una disposición anatómica simétrica bien definida. **(C)** Rastreo comparativo en pitón bola (*Python regius*); captura ecográfica que confirma la constancia en el patrón de ecogenicidad anecoica y el tamaño reducido de las estructuras ováricas propias de la inactividad reproductiva o inmadurez estacional.

CONCLUSIONES

El presente estudio de investigación demuestra que la ultrasonografía diagnóstica constituye una herramienta tecnológica de alta fidelidad, excelente resolución y absoluta inocuidad para la evaluación anatómica y el sexado efectivo de serpientes hembra. La identificación de folículos con ecogenicidad anecoica y morfología circular regular en los ejemplares de *Pituophis deppei*, *Boa constrictor* y *Python regius* permitió diagnosticar con precisión un estado de reposo fisiológico correspondiente a la fase previtelogénica estacional. Se concluye que las variaciones observadas en la densidad acústica de *Lampropeltis triangulum* evidencian la sensibilidad del método para detectar transiciones sutiles en la maduración ovárica, mientras que los hallazgos micrométricos en *Lampropeltis californiae* confirman que el tamaño y número folicular están directamente supeditados

al desarrollo ontogénico y la edad cronológica del animal. Por ende, la correcta interpretación de un examen ecográfico en ofidios exige una correlación analítica individualizada que integre la historia clínica, edad, especie y estatus biológico del paciente, consolidando a la ecografía como el pilar fundamental para los programas de conservación y bienestar de la fauna herpetológica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Banzato T, Russo E, Finotti L, Milan MC, Gianesella M, Zotti A (2012). Ultrasonographic anatomy of the coelomic organs of boid snakes (*Boa constrictor imperator*, *Python regius*, *Python molurus molurus*, and *Python curtus*). American Journal of Veterinary Research, 73(5), 634-645.
2. Bertocchi M, Bigliardi E, Pelizzone I, Vetere A, Manfredi S, Cattarossi D, Rizzi M, Di Ianni F (2021). Monitoring of the Reproductive Cycle in Captive-Bred Female *Boa constrictor*: Preliminary Ultrasound Observations. Animals, 11(3069), 1-16.
3. Bryson Jr RW, Hibbitts T (2017). Herpetofauna Mexicana Vol. I. Snakes of Mexico. Herpetological Review, 48(1), 227-228.
4. Garcia VC, de Almeida-Santos SM (2021). Reproductive cycles of neotropical boid snakes evaluated by ultrasound. Zoo Biology, 1-10.
5. Gnudi G, Volta A, Di Ianni F, Bonazzi M, Manfredi S, Bertoni G (2009). Use of ultrasonography and contrast radiography for snake gender determination. Veterinary Radiology & Ultrasound, 50(3), 309-311.
6. Matayoshi PM, Souza PM, Gasparotto VPO, Araujo MS, Simões CRB, Souza FF, Oba E, Machado VMV, Júnior RSF, Prestes NC (2018). Hormonal and ultrasonographic characterization of the seasonal reproductive cycle of male and female *Crotalus durissus terrificus*. Animal Reproduction, 15(4), 1236-1245.
7. Oliveri M, Sandfoss MR, Reichling SB, Richter MM, Cantrell JR, Knotek Z, Roberts BM (2022). Ultrasound Description of Follicular Development in the Louisiana Pinesnake (*Pituophis ruthveni*, Stull 1929). Animals, 12(2983), 1-14.
8. Rizzi S, Faverzani S, Schnitzer P (2017). Ultrasound sex determination in snakes: Correlation between hemipenes or hemiclitorids and body morphological parameters. En: Proceedings of the 3rd International Conference on Avian Herpetological and Exotic Mammal Medicine, Venice, Italy, 547-830.
9. Urbanová D, Halán M (2016). The use of ultrasonography in diagnostic imaging of reptiles. Folia Veterinaria, 60(4), 51-57.
10. Vetere A, Capasso M, Di Ianni F (2025). Sex Determination in Reptiles: A Review. Animals, 15(168), 1-21.

CARACTERIZACIÓN CROMÁTICA DE LA MIEL DE ABEJA EN MÉXICO: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD MEDIANTE EL SISTEMA CIE *L*a*b** Y ESCALA PFUND

Ma. Cristina Vázquez Hernández [1]*, Emeterio Payro De La Cruz[2], Arturo Arreguín Melesio[3], Christian O. Díaz Ovalle[1], Luis A. Noriega González [1], Blanca Cecilia López Ramírez[1]

[1]Docente. Tecnológico Nacional de México en Roque. [2]Docente. Tecnológico Nacional de México en Zona Olmeca. Ignacio Zaragoza s/n, [3]Estudiante. Tecnológico Nacional de México en Roque. ma.vh@roque.tecnm.mx

RESUMEN

Para la industria de los alimentos, la caracterización cromática de la miel de abeja mediante el sistema CIE *L*a*b** y la escala Pfund es una herramienta en la determinación de la calidad, el origen botánico y la estabilidad comercial del producto, por naturaleza, el color es el primer atributo de aceptación por parte del consumidor y un indicador directo de la composición fenólica y mineral. La variedad cromática de la miel cruda, incluye tonos que van desde "blanco agua" hasta "ámbar oscuro". Para su evaluación objetiva es indispensable el uso de tecnologías de precisión como el fotómetro portátil Hanna HI96785. Este equipo mide la transmitancia lumínica comparada con un estándar (Glicerol) para transformar datos ópticos en valores numéricos expresados en la escala Pfund (mm). El presente proyecto tuvo como objetivo analizar miel cruda eliminando la subjetividad del ojo humano y estandarizando los datos con el sistema CIE *L*a*b**. Se analizaron un total de 31 muestras de miel mexicana, 28 muestras fueron recolectadas de la zona sureste del país, específicamente de comunidades del estado de Tabasco, caracterizadas por su alta biodiversidad de flora selvática nativa, mientras que 3 muestras provinieron de la zona del Bajío (zonas rurales de Celaya, Guanajuato), permitiendo un contraste geográfico y botánico. Los resultados revelaron que la media de las muestras obtenidas del sureste de México fue de 128 mm Pfund (categoría Ámbar Oscuro), lo cual es típico de la zona de recolección debido a su alto contenido de minerales y compuestos antioxidantes, por otro lado, la media de las mieles del Bajío fue de 82.10 mm Pfund (categoría Ámbar Claro). Los indicadores anteriores pueden funcionar como biomarcadores de inocuidad, ya que valores cercanos al límite superior (150 mm) pueden correlacionarse con la formación de hidroximetilfurfural (HMF), el cual está relacionado con el tiempo de almacenamiento del producto o calentamiento excesivo durante el envasado, dando lugar a una degradación de su valor comercial y sus características nutracéuticas. Además, fue identificada una correlación inversa entre los milímetros Pfund y la luminosidad (*L**), las mieles del sureste presentaron valores de (*L**) significativamente bajos (media de 38.20) mientras que, las mieles del Bajío tuvieron un valor de (*L**) de 62.40.

La presente investigación puede ser una estrategia para el empoderamiento de las comunidades rurales productoras de miel de nuestro país, respaldando su calidad y asegurando su autosuficiencia alimentaria. Este estudio demuestra que mediante el uso de equipos de fotometría digital se puede caracterizar el color de la miel el cual tiene una relación directa con la flora e la región de la cual se obtiene este producto, así como con los cambios que se producen durante su almacenamiento procesamiento. Con esta tecnología se puede revalorizar la miel e incentivar a la preservación de la biodiversidad de las zonas rurales.

Palabras clave: Adulteración, cromaticidad, estandarización, luminancia, revalorización.

INTRODUCCIÓN

La miel de abeja (*Apis mellifera*) esta compuesta principalmente por fructosa y glucosa, estos carbohidratos son responsables de su contenido calórico, dulzor, propiedades reológicas y

tecnológicas, es considerado un alimento con características funcionales debido a sus componentes bioactivos, entre ellos compuestos fenólicos, flavonoides, enzimas, ácidos orgánicos y péptidos, los cuales le confieren propiedades antioxidantes, antimicrobianas, antiinflamatorias e inmunomoduladoras que pueden contribuir a disminuir la incidencia de enfermedades. Debido a su índice glicémico moderado se ha convertido en un alimento de interés en la industria alimentaria como fuente importante de carbohidratos, por lo cual su control de calidad exige metodologías de análisis precisas para identificar su deterioro y adulteración. Entre sus propiedades físicas, el color es un indicador que determina la aceptación del consumidor y valorización comercial en mercados nacionales e internacionales. El perfil cromático (Caracterización cuantitativa y cualitativa del color) se asocia directamente con la composición química de la miel, el tiempo de almacenamiento y la adición de compuestos ajenos a la naturaleza propia del alimento, mostrando correlaciones significativas con el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y minerales, los cuales contribuyen de manera decisiva con su capacidad antioxidante y funcionalidad (Ortega-Bonilla et al., 2021; Escuredo et al., 2021).

De forma cotidiana, los productores e incluso la industria alimentaria han realizado la evaluación del color mediante análisis sensorial utilizando métodos visuales por comparación con muestras patrón, altamente dependientes del observador (jueces entrenados, semientrenados o a nivel consumidor) lo que ocasiona subjetividad y variabilidad en el análisis. El uso de instrumentales de precisión, principalmente el espacio de color CIE *L*a*b** y la escala Pfund, permite una cuantificación objetiva y reproducible del color. El sistema CIE *L*a*b** describe el color en un espacio tridimensional que refleja luminosidad (L*: claridad (0 = negro, 100 = blanco) y tonos o colores primarios (a*: variación entre verde (-) y rojo (+); b*: variación entre azul (-) y amarillo (+)), mientras que la escala Pfund (expresada en milímetros) clasifica las mieles desde “blanco agua” hasta “ámbar oscuro”, facilitando la estandarización comercial. En alimentos como la miel, el perfil cromátido determinado de forma digital y automatizada, mediante espectrofotometría o fotometría de transmitancia, puede ser una herramienta robusta para la clasificación, autenticación y control de calidad de mieles de diversa procedencia (Bodor et al., 2021).

La amplia diversidad de flora en México favorece la producción de mieles con perfiles fisicoquímicos, sensoriales y cromáticos altamente diferenciados, provocando una variabilidad de color, contenido fenólico y actividad biológica (Sánchez-Mundo et al., 2024). Regiones tropicales del sureste (Tabasco y Yucatán), así como zonas templadas o semiáridas del Bajío (Guanajuato, Querétaro y Michoacán) y del occidente (Jálisco), generan mieles con características contrastantes, generando un patrón de color asociado a las diferencias en el contenido de minerales y antioxidantes (fenoles y flavonoides, principalmente).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue realizar la caracterización cromática de 31 muestras de mieles crudas mexicanas procedentes de las regiones del Sureste (Tabasco) y el Bajío (Celaya), empleando el fotómetro portátil Hanna HI96785 para la determinación del color en escala Pfund y su correlación con sistemas de estandarización óptica. Con ello se busca generar una línea base de datos colorimétricos precisos que funcionen como biomarcadores críticos de origen, calidad e inocuidad, contribuyendo al fortalecimiento del valor agregado y a la competitividad de la miel mexicana en el sector agroalimentario, contribuyendo a la soberanía alimentaria de grupos vulnerables.

TEORÍA

La producción de miel (apicultura) es una actividad agropecuaria estratégica de gran importancia en el mundo. Las abejas son los principales polinizadores de los cultivos y la miel, así como otros productos de alto valor comercial obtenidos de las colmenas (jalea real, cera, propoleo, polén, apitoxina) son esenciales para la seguridad alimentaria y la conservación de ecosistemas. Cabe mencionar que a nivel mundial, entre 2000 y 2013, las exportaciones crecieron de 380 mil a 583 mil toneladas (53 % de aumento). China lidera las exportaciones con 21 % de participación, seguida de

Argentina; países europeos como Estados Unidos y Alemania figuran como principales importadores (Sokhai y Mardy, 2024).

México se ubica consistentemente entre los principales productores y exportadores de miel. Un análisis reciente del sistema agroalimentario apícola, con datos de FAOSTAT y del SIAP, señala que en 2019 el país ocupó el noveno lugar mundial con unas 64 mil toneladas y la capacidad de exportar cerca del 50 % de su producción. Entre 2006 y 2016, el número de colmenas mexicanas aumentó 6 %, mientras que el volumen producido y el rendimiento por colmena disminuyeron 1.6 % y 7.5 %, respectivamente; en contraste, el valor económico de la producción, el precio pagado al productor y el ingreso por unidad se incrementaron 14 %, 5.7 % y 8.5 %. Lo anterior ha propiciado un esquema de reconversión hacia un menor volumen relativo con mayor valor, debido a la incorporación de la miel mexicana en mercados internacionales. En este contexto, cabe mencionar que la apicultura tiene una relevancia estratégica para la autosuficiencia y la seguridad alimentaria, además de ser una fuente de ingresos para los productores rurales (Magaña y Leyva, 2011; Phiri et al., 2022).

Al ser México uno de los principales exportadores de miel, se enfrenta a grandes desafíos como el rendimiento, el número de colmenas y vulnerabilidad a factores climáticos y socioeconómicos. Existe una tensión global entre el crecimiento de la demanda de cultivos dependientes de polinizadores y la evolución de las colmenas, lo cual puede afectar la estabilidad de la producción de miel, así como su calidad; lo anterior, sumado a la adulteración y falsificación de este producto con jarabes de alta fructosa (JMAF) o jarabes de azúcar invertido industrial, lo cual ocasiona una grave problemática para los consumidores (Balvino-Olvera, 2023).

La miel de abeja es una matriz de carbohidratos (principalmente fructosa y glucosa), agua y componentes bioactivos. El color de la miel cruda es una variable física dinámica y multifactorial. Aunque los azúcares constituyen la fracción mayoritaria, las variaciones cromáticas están estrictamente relacionadas con componentes químicos intrínsecos transferidos desde el néctar y el polen de la flora visitada por *Apis mellifera* y los procesos a los cuales es sometida (térmicos, adición de sustancias químicas, agitación, almacenamiento, etc.) (Nakib et al., 2024). Para analizar estas variaciones se utilizan diversos métodos, entre ellos los espectrofotométicos. La escala Pfund es un estándar geométrico e instrumental para regular la clasificación comercial de la miel, permite ubicar las muestras analizadas en siete estratos comerciales que abarcan desde el Blanco agua (< 8 mm) hasta el Ámbar oscuro (>114 mm). Este análisis se fundamenta en la Ley de Beer-Lambert, al hacer incidir un haz de luz monocromática con una intensidad inicial (I_0) a una longitud de onda fija de λ = 420 nm a través de una celda espectrofotométrica de paso óptico estandarizado (b = 10 mm), los cromóforos nativos absorben una fracción de los fotones. La intensidad de la luz transmitida (I) permite calcular la trasmitancia (T) y la absorbancia (A) (Ecuación 1 y 2) (Bodor et al., 2021; Escuredo et al., 2021).

$$\boldsymbol{T = \frac{I}{I_0}}$$ Ecuación 1

$$\boldsymbol{A = -\log_{10}(T)}$$ Ecuación 2

Actualmente, existen equipos automatizados como el fotómetro Hanna HI96785 que calculan la absorbancia relativa tomando como blanco analítico estándar (100 % de transmitancia o 0 mm Pfund) glicerol puro de alta selectividad óptica a longitud de onda de 420 nm. Posterior a realizar la calibración y las lecturas de las muestras, se realiza una conversión matemática integrada en el microprocesador del equipo para convertir la respuesta fotónica en milímetros Pfund.

El espacio tridimensional uniforme de color CIE *L*a*b* mejora la caracterización de la escala Pfund para lograr obtener una huella dactilar óptica, este sistema matemático modela la percepción del color a través de tres coordenadas cartesianas ortogonales: Eje *L** (Luminosidad – escala de grises; indica contenido de polifenoles y complejos minerales), coordenada *a** (Cromaticidad Rojo-Verde;

presencia de complejos de hierro eleva significativamente esta coordenada), coordenada *b** (Cromaticidad Amarillo – Azul; Indica flavonoides y carotenoides estables) (Sánchez-Mundo et al., 2024).

El análisis cromático actúa como un biomarcador no destructivo de la estabilidad química y asegura la calidad e inocuidad de la miel. Cuando este alimento se almacena en condiciones no adecuadas (Temperaturas > 30 °C) o es sometida a un estrés térmico durante los procesos industriales, se activan diversas rutas bioquímicas críticas de pardeamiento no enzimático entre ellas reacciones de Maillard y deshidratación de Hexosas Catalizadas por Ácidos que dan como resultado la generación de 5-hidroximetilfurfural (HMF) alterando la colorimetría dando lugar a cambios hacia el color Ámbar oscuro. Este análisis puede ser utilizado como seguimiento espectrofotométrico sistemático de alerta para posible pérdida de valor comercial y nutricional.

PARTE EXPERIMENTAL

1. **Diseño Experimental y Origen de las Muestras**. Se implementó un diseño de muestreo estratificado no probabilístico durante el periodo de cosecha apícola. Fueron recolectadas un total de 31 muestras de miel cruda de *Apis mellifera* (28 muestras de la región sureste de México de comunidades rurales distribuidas en el estado de Tabasco y 3 muestras de la región del Bajío localizadas en la zona periférica de Celaya, Guanajuato). Como criterio de inclusión y control analítico, se garantizó que todas las matrices biológicas fueran recolectadas en su estado fresco y crudo, exentas de cualquier tratamiento industrial previo de filtración fina, microfiltración, pasteurización o desprecintado por calentamiento forzado. Cada muestra (250 mL) fue recolectada en envases herméticos de polietileno de alta densidad de grado alimentario previamente estériles. Las muestras fueron rotuladas y transportadas al laboratorio de análisis de alimentos en condiciones controladas (20 a 22 °C).
2. **Determinación fotométrica.** La cuantificación objetiva del color en milímetros de la escala Pfund se efectuó por triplicado mediante espectrofotometría de transmitancia empleando un fotómetro digital portátil especializado para análisis de miel (Hanna Instruments, modelo HI96785). La secuencia del protocolo fue la siguiente: Ajuste a cero (Calibración basal), se agregan 4 mL de glicerol de alta pureza como reactivo de referencia (blanco) a la celda de 10 mL, previamente sanitizada y libre de impurezas y contaminantes. Se configuró el microprocesador del fotómetro para establecer el (100 %) de transmitancia lumínica (0 mm escala Pfund). Posteriormente se elimina el contenido de la celda y se sanitiza y seca adecuadamente según el instructivo del fabricante. Para la medición de las muestras, en la celda limpia, fueron agregados (4 mL) de miel homogeneizada libre de burbujas. La celda se colocó en el portamuestras del equipo y se realizó la medición a una longitud de onda de λ = 420 nm. Posteriormente fue realizada la conversión digital utilizando el software del equipo y fue determinado el perfil cromático CIE (*L*a**b).
3. **Procesamiento Matemático y Análisis Estadístico.** Los datos experimentales recolectados de las lecturas por triplicado fueron tabulados y ordenados en hojas de cálculo para su posterior tratamiento estadístico descriptivo e inferencial utilizando el software especializado Minitab (v.19, Minitab LLC). Se calcularon las medidas de tendencia central y dispersión para cada grupo experimental (Sureste y Bajío), incluyendo la media aritmética, la desviación estándar (DE) y el error estándar medio (SEM) además, fue realizado un Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor, comparación múltiple de medias aplicando la Prueba de Comparación Múltiple de Tukey. Todos los contrastes estadísticos se evaluaron bajo un nivel de confianza del (95 %), estableciendo un umbral de significancia analítica crítico de ($p < 0.05$).

RESULTADOS

El Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor demostró de manera contundente que el origen geográfico ejerce un efecto crítico altamente significativo ($p < 0.001$)) sobre todas las variables cromáticas e instrumentales evaluadas. Las 31 muestras de miel exhibieron una marcada variabilidad óptica, los resultados mostraron un rango de valores global que osciló entre los 80.33 y

los 149.66 mm Pfund (Tabla 1). Estos resultados mostraron que las mieles provenientes de las comunidades del estado de Tabasco se posicionaron de manera general en la categoría de la clasificación comercial como "Ámbar oscuro", es decir, fueron predominantemente menos claras que las obtendidas de la región del Bajío. Lo anterior puede ser ocasionado debido a que su comportamiento físico-químico está intrínsecamente ligado a las condiciones edafoclimáticas de sureste de nuestro país (Zona selvática). Por lo general y de acuerdo a la literatura, las mieles de esta región son producidas a partir de néctares multiflorales (especies selváticas de la familia *Fabaceae* y *Astereaceae*) y de sistemas de manglar principalmente *Avicennia germinans.* Estas especies botánicas producen una elevada cantidad de compuestos antioxidantes principalmente fenólicos, además de asimilar cationes minerales solubles, los cuales son transferidos al néctar y posteriormente a las mieles. Escuedero et al., en 2021, menciono que los iones de metales como el hierro (Fe) y el cobre (Cu) pueden formar complejos de coordinación con los grupos hidroxilo de los compuestos antioxidantes (Flavonoides), esta reacción puede incrementar la absorción de la luz cuando se realizan análisis cromáticos resultando en niveles altos de la esclala Pfund y dando lugar a coloraciones oscuras y opacas del alimento.

Tabla 1. Perfil cromático de las muestras de miel por origen geográfico y clasificación comercial. L (Luminosidad), *a** (Coordenada *a**), b (Coordenada *b**).

Región Geográfica	No. de muestras	Escala Pfund (mm)	L	*a**	*b**	Clasificación comercial
Sureste (Tabasco)	28	128.45 ±11.22[a]	38.20 ±3.15[b]	+11.45 ±1.08[a]	+41.60 ±2.95[b]	Ámbar Oscuro
Bajío (Guanajuato)	3	82.10± 1.85[b]	62.40± 1.10[a]	+3.12± 0.42[b]	+54.80± 1.50[a]	Ámbar Claro

Nota: Valores con letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Por el contrario, los resultados del análisis de las muestras de miel de la zona del Bajío, arrojaron una media de 82.10 mm Pfund, clasificandose en el estrato de Ámbar Claro. Estas mieles, son obtenidas del néctar de floraciones mayoritariamente uniflorales y arbustivas de zonas áridas y semicálidas del centro del país (como el mezquite), con base en las pruebas estadísticas poseen una densidad de pigmentos significativamente menor, lo cual fue observado en sus características de apariencia con tonalidades doradas translúcidas y fluidas, consistentes con perfiles de bajo contenido mineral (Sánchez-Mundo et al., 2024).

La evaluación entre el sistema CIEL *L*a*b** y la escala Pfund identificó una correlación inversa muy estrecha entre los milímetros Pfund y el parámetro de luminosidad (*L**). Como se detalla en la Tabla 1, las mieles del sureste presentaron valores de (*L**) significativamente bajos (media de 38.20), lo que confirma su opacidad óptica. En contraste, las mieles del Bajío exhibieron un valor medio de (*L**) de 62.40, denotando una alta transmisión fotónica y color claro.

Con respecto a los valores de las coordenadas cromáticas, el valor de (*a** - dirección rojo) fue notablemente superior en las mieles de Tabasco (+11.45) respecto a las del Bajío (+3.12). Esta diferencia de desplazamiento en el eje *a** hacia la región de los tonos rojizos-pardos puede considerarse como un indicador físico de la interacción polifenol - metal de los ecosistemas húmedos de la región selvática del sureste de México. Por otro lado, la coordenada (*b** - dirección amarillo) obtuvo valores elevados en ambas regiones, presentado diferencia estadística significativa en las mieles del Bajío (+54.80) en comparación con las del Sureste (+41.60). Los resultados anteriores evidencian que, a pesar del oscurecimiento observado en las muestras de Tabasco, los componentes de pigmentación amarillo (flavonoides tipo quercetina y carotenoides) se mantienen estables, pero parcialmente enmascarados por la absorbancia de la matriz (Ámbar oscuro), un comportamiento óptico documentado previamente por Bodor et al. (2021).

Un punto importante de este proyecto de investigación fue la evidencia de los resultados del análisis de las muestras del sureste las cuales se aproximaron al límite superior crítico de la escala, registrando valores de hasta 149.66 mm Pfund. Valores altos en la escala Pfund podría considerarse como un biomarcador para mieles crudas frescas, que identifica los productos que tengan un origen botánico selvático o de manglar virgen con un alto contenido antioxidante (Ortega-Bonilla et al., 2021). No obstante, en la industria alimentaria, un valor cercano a los 150 mm Pfund indica un limite de pardeamiento no enzimático acumulado, es decir, si estas mieles oscuras fuesen sometidas a un almacenamiento deficiente (temperaturas superiores a los 30 °C) en las bodegas de acopio rurales, o si fueran sobrecalentadas durante el envasado industrial para disminuir su viscosidad podría provocar la formación acelerada de 5-hidroximetilfurfural (HMF) y la polimerización de melanoidinas (Reacción de Maillard) lo cual ocasionaría que el índice óptico estuviera fuera de los rangos permitidos por las regulaciones internacionales (Codex Alimentarius), devaluando su valor comercial y ocasionando la pérdida de sus propiedades funcionales.

CONCLUSIONES

la integración del sistema CIE *L*a*b*,* demostró poseer una alta sensibilidad analítica que puede ser utilizada como un sistema de alerta temprana contra fraudes alimentarios comunes, tales como la adulteración mediante la adición intencional de jarabes de maíz de alta fructosa (JMAF), azúcares invertidos o incluso piloncillo. Según la literatura, Las mieles adulteradas modifican de forma abrupta las coordenadas cromáticas nativas, provocando incrementos en la luminosidad (*L**) y disminución drástica en la coordenada (*a**) provocado por la baja o dilución en el contenido de los complejos fenólicos-minerales naturales. Además, permite rastrear los microcambios ópticos generados durante las etapas iniciales de la cristalización, permitiendo predecir la vida de anaquel de la miel (Gün y Karaoğlu, 2024). Al integrar la escala Pfund a este sistema, se logró caracterizar con precisión y reproducibilidad la calidad de la miel de abeja de la región de Tabasco y del Bajío.

Además, mediante estos análisis fue demostrado que, la coloración intensamente oscura de las mieles de selva y manglar de Tabasco no constituye un defecto físico ni un indicador de degradación o impureza. Por el contrario, es una propiedad intrínseca que puede ser utilizada como un biomarcador de calidad correlacionada con una elevada capacidad antioxidante derivada de sus componentes bioactivos. Sin embargo, en procesos industriales, la detección de valores cercanos al límite crítico de la escala (149.66 mm Pfund) evidencia la necesidad de implementar protocolos analíticos de control térmico rigurosos durante las fases de postcosecha, acopio y envasado con la finalidad de prevenir procesos de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard) que deriven en la síntesis de 5-hidroximetilfurfural (HMF).

El aporte de esta investigación es establecer las bases tecnológicas sólidas que puedan ofrecer a los productores apícolas rurales una estrategia viable para el análisis de calidad de la miel, revalorizando su producto y combatiendo el fraude alimentario por adulteración. Además de promover la preservación de la flora nativa, la biodiversidad y la seguridad alimentaria. En el sector industrial puede ser una herramienta científica para el control de procesos en la línea de producción, asegurando el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Alcivar-Saldaña, M. Rodríguez-Monroy, L. Carrillo-Miranda, & M. Canales-Martínez, “Botanical Origin and Biological Properties of Honey and Propolis from Cuautitlan, State of Mexico, Mexico”. Antioxidants, 13, 2024. https://doi.org/10.3390/antiox13070874
2. F. J. Balvino-Olvera, J. Lobo, M.J. Aguilar-Aguilar, G. Ruiz-Guzmán, A. González-Rodríguez, I. Ruiz-Mercado, A. Ghilardi, M. A. Del Coro, & M. Quesada, “Long-term spatiotemporal patterns in the number of colonies and honey production in Mexico”, Scientific Reports, 13, 2023. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25469-8

3. Z. Bodor, C. Benedek, Á. Urbin, D. Szabo, & L. Sipos, “Colour of honey: can we trust the Pfund scale? – An alternative graphical tool covering the whole visible spectra”, Lwt –. Food Science and Technology, 149, 111859. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111859
4. O. Escuredo, M. Rodríguez-Flores, L. Meno, & M. Seijo, “Prediction of Physicochemical Properties in Honeys with Portable Near-Infrared (microNIR) Spectroscopy Combined with Multivariate Data Processing”, Foods, 10, 2021. https://doi.org/10.3390/foods10020317
5. R. Gün, & M. Karaoğlu, “Detection of honey adulteration by characterization of the physico-chemical properties of honey adulterated with the addition of glucose–fructose and maltose corn syrups”, European Food Research and Technology, 250, 2024, 2255 - 2272. https://doi.org/10.1007/s00217-024-04535-7
6. M. A. Magaña, & C. E. M. Leyva, “Costos y rentabilidad del proceso de producción apícola en México. Contaduría y administración”, (235), 2011, 99-119.Disponible en: https://www.scielo.org.mx/pdf/cya/n235/n235a6.pdf
7. P. Mondragón-Cortéz, J. Ulloa, P. Rosas-Ulloa, R. Rodríguez-Rodriguez, & J. Vazquez, “Physicochemical characterization of honey from the West region of México”, CyTA - Journal of Food, 11, 2013, 13 – 7. https://doi.org/10.1080/19476337.2012.673175
8. R. Nakib, A. Ghorab, S. Harbane, Y. Saker, A. Ouelhadj, M. S. Rodríguez-Flores, & O. Escuredo, “Sensory attributes and chemical composition: The case of three monofloral honey types from Algeria”, Foods, 13(15), 2024, 2421. https://doi.org/10.3390/foods13152421
9. R. Ortega-Bonilla, C. Morales-Hormiga & D. Chito-Trujillo, “Evaluación de características fisicoquímicas, compuestos fenólicos, contenido de minerales y color de mieles comerciales del Cauca (Colombia)”, 4, 2021. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1894
10. B. J. Phiri, D. Fèvre, & A. Hidano, “Uptrend in global managed honey bee colonies and production based on a six-decade viewpoint, 1961–2017”, Scientific Reports, 12, 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-25290-3
11. M. Sánchez-Mundo, G. Nila-Méndez, V. Espinosa-Solís, J. Gabino-Roman, R. Hernández-Nava, D. Chipol-Pava, & E. Domínguez, “Determination of bioactive compounds and physicochemical param-eters of honey produced in the state of Veracruz”, Mexico, Agro Productividad, 2024, https://doi.org/10.32854/agrop.v17i2.2701
12. K. Sokhai, & S. Mardy, “A Review on the Aspect of Beekeeping and Economic Efficiency”. International Journal of Integrative Research, 2024. https://doi.org/10.59890/ijir.v2i2.1223

EFECTO DE LA ILUMINACIÓN LED EN LA FIRMEZA Y ACEPTABILIDAD SENSORIAL DEL *Pleurotus Ostreatus*

Nalleli Trancoso Reyes [1(*)], Laura Anabel Páez Olivan [1], Carmen Zulema Quiñones Pérez [1], Jaime Herrera Gamboa [1], Artemisa Luevano de la Cruz [2], Merit Cisneros González [1], Luis Enrique Nevárez Cabada [1], Johana Judith Sainz Ortega[1]

[1]SECIHTI-Instituto Tecnológico Nacional de México Campus Valle del Guadiana, [2]Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 130.
*natrancoso@gmail.com

RESUMEN

La aceptabilidad y firmeza de los productos hortofrutícolas frescos son factores críticos que influyen en su calidad y vida útil. En este contexto, la tecnología de diodos emisores de luz (LED) ha surgido como una alternativa innovadora para mejorar las condiciones de almacenamiento y conservación. A través de la aplicación de diferentes longitudes de onda de luz, es posible modificar procesos modulares fisiológicos como la maduración, la síntesis de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante, lo que ofrece una vía potencialmente económica y sostenible para la preservación de productos agrícolas. Esta investigación se centró en el efecto de las longitudes de onda de 450 y 610 nm sobre el hongo comestible *Pleurotus ostreatus* analizando la respuesta de firmeza y aceptabilidad general a través de una evaluación sensorial. Se llevaron a cabo experimentos con tres lotes de tratamientos LED durante la fase de cultivo: cosecha blanca (CB), cosecha roja (CR) y cosecha azul (CA), así como nueve tratamientos postcosecha combinando las tres longitudes de onda. La evaluación sensorial involucró a 50 panelistas no entrenados, quienes valoraron aspectos como textura, color, olor y preferencia general en una escala hedónica de 5 puntos a los seis días de almacenamiento. La firmeza se determinó en los días 0 y 6 de almacenamiento, utilizando un analizador de textura TA.XT2 Plus, con un émbolo metálico de 2 mm de diámetro y una velocidad de penetración de 4 mm/s hasta una distancia de 5 mm. Los análisis estadísticos se realizaron mediante comparación múltiple de medias utilizando la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $P<0.05$. Los resultados de la evaluación sensorial demostraron que los tratamientos de cultivo con luz LED a 450 y 610 nm aumentaron significativamente la aceptabilidad general *del Pleurotus ostreatus*. También se observó una mayor firmeza en las muestras expuestas a luz roja y azul, siendo la muestra CRPR la que alcanzó el mayor valor de firmeza (2.40 ± 0.03 N). En contraste, los tratamientos cultivados bajo luz blanca mostraron una menor firmeza al sexto día. La preservación de la firmeza en los tratamientos cosechados con luz LED sugiere que estas longitudes de onda podrían retardar la degradación de polisacáridos estructurales y proteínas responsables de la textura, un parámetro fundamental a considerar durante la vida comercial de estas setas. Estos hallazgos no solo contribuyen a la comprensión de la influencia de la iluminación LED en la calidad del *Pleurotus ostreatus*, sino que también proporcionan una base sólida para optimizar esquemas de iluminación dirigidos a mejorar la conservación de productos hortofrutícolas

INTRODUCCIÓN

Garantizar la vida útil de los alimentos postcosecha es un reto comercial y nutricional complejo. La tecnología LED surge como una herramienta innovadora y de bajo costo capaz de controlar el metabolismo celular mediante longitudes de onda específicas (Sena et al., 2024). No obstante, la investigación de esta técnica en hongos comestibles postcosecha es limitada. Dado que las setas sufren una senescencia acelerada que degrada sus componentes estructurales, resulta imperativo investigar este método para prevenir la pérdida de calidad textural y garantizar una óptima aceptabilidad sensorial en el mercado. El presente estudio busca disminuir la brecha de información al evaluar sistemáticamente el efecto de la tecnología LED con diferentes longitudes de onda, tanto durante el ciclo de cultivo como en la fase crítica de postcosecha. El género de *Pleurotus spp* es de suma relevancia para la seguridad alimentaria y la bioeconomía, ya que representa

aproximadamente el 25% del total mundial de hongos cultivados debido a su alta adaptabilidad y rápido crecimiento. Al analizar de forma integrada ambas etapas biológicas, esta investigación pretende determinar cómo la estimulación lumínica en el cultivo influye sobre la resistencia del tejido y cómo el tratamiento posterior puede mitigar el impacto del entorno físico sobre los cuerpos fructíferos, así mismo entender la correlación directa entre estas modificaciones microestructurales y la percepción del consumidor.

TEORÍA

El cultivo del hongo ostra (*Pleurotus spp*.) es uno de los pilares de la fungicultura global, representando aproximadamente el 25% del total de hongos cultivados a nivel mundial (Raman et al., 2020). Su producción a gran escala destaca por la viabilidad económica que ofrece al aprovechar una amplia gama de residuos agroindustriales de bajo costo bajo técnicas de manejo relativamente simples comparadas con otros hongos comestibles (Jegadeesh et al., 2018; Valencia del Toro et al., 2018). Sin embargo, a pesar de sus ventajas biotecnológicas y su alto valor nutricional y medicinal, su demanda en el mercado fresco se ve severamente limitada. Esta limitación comercial se debe a que las setas poseen una vida útil extremadamente corta en comparación con otros productos hortofrutícolas (Sapata et al., 2009). Las setas carecen de una cutícula protectora externa y exhiben una tasa de respiración metabólica muy elevada, lo que desencadena una rápida pérdida de agua por transpiración celular y deshumidificación justo después de la cosecha (Jafri et al., 2013). Este fenómeno físico impacta de manera directa y negativa en la calidad del hongo, provocando el ablandamiento acelerado de los tejidos y la senescencia prematura de los cuerpos fructíferos (Nongthombam et al., 2021). La evaluación de las propiedades físicas (especialmente la firmeza) es la métrica estándar para determinar el comportamiento mecánico de los tejidos durante las operaciones de empaque, manejo y transporte (Yang et al., 2020). En los hongos comestibles, la firmeza está intrínsecamente ligada a la integridad de su ultraestructura celular y a la composición molecular de la pared de las hifas, compuesta principalmente por quitina y glucanos (Zivanovic et al., 2000). La implementación de la tecnología de diodos emisores de luz (LED) se presenta como una alternativa física innovadora, de bajo costo energético y no térmica para la conservación alimentaria moderna (Poonia et al., 2022; Sena et al., 2024).

PARTE EXPERIMENTAL

Se realizaron 3 lotes experimentales de tratamientos LED de *Pleurotus ostreatus* en la fase de cultivo, CB (cosecha blanca), CR (cosecha roja), CA (cosecha azul) y 9 tratamientos postcosecha: CBPB (Cosecha blanca- postcosecha blanca), CBPR (Cosecha blanca- postcosecha roja), CBPA (Cosecha blanca- postcosecha azul), CRPB (Cosecha roja- postcosecha blanca), CRPR (Cosecha roja- postcosecha roja), CRPA (Cosecha roja- postcosecha azul), CAPB (Cosecha azul- postcosecha blanca), CAPR (Cosecha azul- postcosecha roja), CAPA (Cosecha azul- postcosecha azul). El cultivo de *Pleurotus ostreatus* se realizó en el Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana, Durango, México. Durante la incubación, la temperatura se mantuvo a 22°C, y en la etapa de cultivo a 16°C. Las bolsas de cultivo se colocaron en áreas separadas con luz roja (610nm), azul (450nm) y natural. El sustrato utilizado fue rastrojo de maíz. Para la fase de crecimiento, se usó un fotoperiodo de 8 horas de luz y 16 horas de oscuridad. En la etapa postcosecha, se utilizó refrigeración a 4 °C y la iluminación LED correspondiente para los diferentes tratamientos (24 horas/día) por 6 días de almacenamiento.

La evaluación sensorial se realizó a 50 panelistas no entrenados, quienes valoraron los aspectos de textura, color, olor y aceptación general en una escala hedónica de 5 puntos, a los seis días de almacenamiento. Las referencias en la escala hedónica fueron las siguientes: para color blanco (valor 1) y color café (valor 5), textura blanda (valor 1) y textura dura (valor 5), olor tenue (valor 1) y olor fuerte (valor 5), aceptación general, no me gusta (valor 1) y me gusta muchísimo (valor 5).

La firmeza se determinó en los días 0 y 6 de almacenamiento, utilizando un analizador de textura TA.XT2 Plus, con un émbolo metálico de 2 mm de diámetro y una velocidad de penetración de 4

mm/s hasta una distancia de 5 mm. Los análisis estadísticos se realizaron mediante comparación múltiple de medias utilizando la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $P<0.05$.

RESULTADOS

Los perfiles de firmeza instrumental evaluados a lo largo del periodo postcosecha revelaron una dependencia significativa respecto a la luz aplicada durante la fase de cultivo y almacenamiento (Tabla 1). Los cuerpos fructíferos expuestos a luz blanca exhibieron los valores de firmeza más bajos desde el inicio del ensayo, en contraste con aquellos tratados con luz roja y luz azul, los cuales manifestaron una consistencia estructural superior y estadísticamente diferenciable en el día 0. A lo largo de los 6 días de almacenamiento, la tasa de ablandamiento global no superó el 32% de pérdida en los tratamientos menos favorables. Este fenómeno de degradación textural fue marcadamente atenuado en los hongos cultivados bajo espectros de luz roja y azul, los cuales retuvieron la mayor integridad física al término del experimento, registrando una pérdida máxima de firmeza de apenas el 12.21%. La pérdida de firmeza ha sido analizada por diferentes autores como Jafri et al. (2013) quienes asociaron de forma directa el deterioro general de las setas con el colapso de su textura, reportando una pérdida drástica de firmeza de hasta el 83.16% tras 25 días de almacenamiento empleando diversos pretratamientos y tecnologías de empaque. En un sentido similar, Sapata et al. (2009) documentaron una reducción del 48.40% en la firmeza de *Pleurotus ostreatus* en un periodo de 11 días. La mayor retención textural lograda en la presente investigación sugiere que la manipulación del espectro lumínico actúa como un factor de estrés capaz de modular el metabolismo postcosecha del hongo. Desde una perspectiva fisiológica, la firmeza constituye uno de los indicadores predictivos más robustos de la calidad comercial y la vida útil en hongos comestibles. La modificación de la pared celular y la consecuente pérdida de turgencia se vinculan directamente con la degradación enzimática de polisacáridos estructurales (como la quitina y los glucanos) y complejos proteicos, sumado a la expansión del espacio intercelular en la superficie del píleo (Zivanovic et al., 2000). Se considera que la radiación LED azul y roja promueve la síntesis de compuestos de refuerzo celular o inhibe la actividad de enzimas hidrolíticas endógenas, ralentizando la senescencia y preservando la arquitectura tisular del macromiceto por más tiempo.

Tabla1. Firmeza (N) de Pleurotus ostreatus durante su cosecha y almacenamiento

Tratamiento	Día 0	Día 6
CBPB	1.50 ± 0.01^{Ba}	1.32 ± 0.10^{Fab}
CBPR	1.50 ± 0.01^{Ba}	1.38 ± 0.03^{Fa}
CBPA	1.50 ± 0.01^{Ba}	1.33 ± 0.09^{EFab}
CRPB	2.46 ± 0.15^{Aa}	1.67 ± 0.07^{DEb}
CRPR	2.46 ± 0.15^{Aa}	2.40 ± 0.03^{Aa}
CRPA	2.46 ± 0.15^{Aa}	1.99 ± 0.08^{Bb}
CAPB	2.21 ± 0.02^{Aa}	2.04 ± 0.11^{BCab}
CAPR	2.21 ± 0.02^{Aa}	1.97 ± 0.08^{BCb}
CAPA	2.21 ± 0.02^{Aa}	1.94 ± 0.03^{CDb}

Tratamiento: CBPB (Cosecha blanca-postcosecha blanca), CBPR (Cosecha blanca-postcosecha roja), CBPA (Cosecha blanca-postcosecha azul), CRPB (Cosecha roja-postcosecha blanca), CRPR (Cosecha roja-postcosecha roja), CRPA (Cosecha roja-postcosecha azul), CAPB (Cosecha azul-postcosecha blanca), CAPR (Cosecha azul-postcosecha roja), CAPA (Cosecha azul-postcosecha azul). Las medias en el mismo renglón con diferente letra minúscula indica cambio significativo ($P < 0.05$) entre los diferentes días de almacenamiento, mientras que las medias en la misma columna con diferente letra mayúscula indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los tratamientos el mismo día de almacenamiento (promedio, n=3 por tratamiento ± desviación estándar)

El análisis organoléptico (Tabla 2) respaldó de manera consistente las determinaciones instrumentales de textura. Los panelistas manifestaron una correlación positiva y directa entre la aceptabilidad general y la firmeza de los cuerpos fructíferos. Los atributos de calidad críticos que determinaron la preferencia de los consumidores fueron la retención de una coloración blanca

(ausencia de pardeamiento) y una textura compacta al tacto; por el contrario, las variaciones en el perfil de olor no ejercieron un impacto estadísticamente significativo en el juicio global. Consecuentemente, el tratamiento CAPB6 (hongos cultivados bajo luz LED azul y conservados en postcosecha bajo luz blanca) alcanzó el índice de satisfacción más elevado. Es importante destacar que no se registraron diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) al evaluar la aceptabilidad general de los tratamientos que involucraron el uso de luces LED rojas o azules combinados con cualquier otro espectro lumínico durante la postcosecha. En contraposición, el tratamiento CBPR6 y CBPA6 se consolidaron como las variantes de menor preferencia por parte de los evaluadores, evidenciando que ciertas combinaciones lumínicas inadecuadas aceleran los procesos de maduración, pérdida de turgencia y deterioro visual del producto.

Tabla 2. Resultados de la evaluación sensorial de *Pleurotus ostreatus* a los 6 días de almacenamiento postcosecha

Tratamiento	Color	Textura	Olor	Aceptación
CBPB6	2.60 ± 0.49^{AB}	2.20 ± 0.75^{B}	3.18 ± 0.92^{A}	3.26 ± 0.48^{AB}
CBPR6	2.62 ± 0.90^{AB}	1.96 ± 0.66^{B}	1.98 ± 0.82^{D}	3.10 ± 0.36^{B}
CBPA6	2.12 ± 0.68^{CD}	2.24 ± 0.96^{B}	3.02 ± 0.79^{AB}	3.10 ± 0.36^{B}
CRPB6	1.88 ± 0.59^{D}	2.24 ± 0.91^{B}	2.18 ± 0.94^{CD}	3.12 ± 0.38^{B}
CRPR6	2.42 ± 0.73^{BC}	2.18 ± 0.44^{B}	2.48 ± 0.92^{BCD}	3.30 ± 0.76^{AB}
CRPA6	2.62 ± 0.78^{AB}	2.40 ± 0.90^{B}	2.32 ± 0.93^{CD}	3.44 ± 0.64^{AB}
CAPB6	1.92 ± 0.63^{D}	3.04 ± 0.91^{A}	3.08 ± 0.93^{AB}	3.52 ± 0.81^{A}
CAPR6	2.92 ± 0.11^{A}	2.44 ± 0.33^{AB}	3.04 ± 0.49^{AB}	3.44 ± 0.76^{AB}
CAPA6	1.96 ± 0.80^{CD}	2.56 ± 0.33^{AB}	2.60 ± 0.90^{ABC}	3.16 ± 0.46^{AB}

Tratamiento: CBPB (Cosecha blanca-postcosecha blanca), CBPR (Cosecha blanca-postcosecha roja), CBPA (Cosecha blanca-postcosecha azul), CRPB (Cosecha roja-postcosecha blanca), CRPR (Cosecha roja-postcosecha roja), CRPA (Cosecha roja-postcosecha azul), CAPB (Cosecha azul-postcosecha blanca), CAPR (Cosecha azul-postcosecha roja), CAPA (Cosecha azul-postcosecha azul). Las medias en la misma columna con diferente letra mayúscula indican diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los tratamientos el mismo día de almacenamiento (promedio, n=3 por tratamiento ± desviación estándar)

CONCLUSIONES

La implementación de la tecnología LED durante el ciclo de cultivo resulta determinante para optimizar la calidad mecánica y la vida útil de *Pleurotus spp*., demostrando que los espectros azul y rojo superan a la luz blanca convencional al inducir una mayor firmeza tisular inicial. Particularmente, los hongos cultivados bajo luz azul exhiben un efecto protector persistente en la postcosecha, restringiendo la pérdida de firmeza tras seis días de almacenamiento, sin embargo, el mejor tratamiento en este periodo de tiempo fue el CRPR. Esta retención de las propiedades mecánicas estructurales demostró una correlación directa y positiva con la aceptabilidad general del consumidor, el cual prefiere setas con mayor firmeza y coloración blanca, sin que el olor represente un factor de diferenciación significativo. En consecuencia, el tratamiento combinado CAPB6 (cultivo con luz LED azul y almacenamiento postcosecha bajo luz blanca) se consolida como el protocolo óptimo para maximizar la calidad comercial y la preferencia organoléptica del hongo. Para dar continuidad a este hallazgo, se sugiere orientar las investigaciones futuras hacia el análisis microscópico de la pared celular mediante microscopía electrónica de barrido, la cuantificación de la actividad enzimática relacionada con la degradación de polisacáridos y proteínas, así como la evaluación del perfil de compuestos bioactivos retenidos tras la aplicación lumínica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jafri, M., Jha, A., Bunkar, D. G., & Ram, R. C. (2013). Quality retention of oyster mushroom (*Pleurotus florida*) by combination of chemical treatments and modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, *76*, 112-118.

2. Jegadeesh, R., Lakshmanan, H., Kab-Yeul, J., Sabaratnam, V., & Raa, N. (2018). Cultivation of Pink Oyster mushroom *Pleurotus djamor* var. *roseus* on various agro-residues by low-cost technique. *Journal of Mycopathologia Research*, *56*(3), 213–220.
3. Nongthombam, J., Kumar, A., Manikanta, L. B., Madhushekhar, M., & Patidar, S. (2021). A review on study of growth and cultivation of oyster mushroom. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, *22*(33-34), 55-65.
4. Poonia, A., Pandey, S., & Vasundhara. (2022). Application of light emitting diodes (LEDs) for food preservation, post-harvest losses and production of bioactive compounds: a review. *Food Production, Processing and Nutrition*, *4*(1), 10.
5. Raman, J., Jang, K. Y., Oh, Y. L., Oh, M., Im, J. H., Lakshmanan, H., & Sabaratnam, V. (2020). Cultivation and nutritional value of prominent *Pleurotus* spp.: An overview. *Mycobiology*, *49*(1), 1-14.
6. Sapata, M., Ramos, A., Ferreira, A., Andrada, L., & Candeias, M. (2009). Changes of quality of *Pleurotus* spp. carpophores in modified atmosphere packaging. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, *8*(2), 17-26.
7. Sena, S., Kumari, S., Kumar, V., & Husen, A. (2024). Light emitting diode (LED) lights for the improvement of plant performance and production: A comprehensive review. *Current Research in Biotechnology*, *7*, 100183.
8. Valencia del Toro, G., Ramirez-Ortiz, M. E., Flores-Ramirez, G., Costa-Manzano, M. R., Robles-Martinez, F., Garin-Aguilar, M. E., & Leal-Lara, H. (2018). Effect of *Yucca schidigera* bagasse as substrate for oyster mushroom on cultivation parameters and fruit body quality. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *17*(3), 835-846.
9. Yang, R. L., Li, Q., & Hu, Q. P. (2020). Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports*, *10*(1), 121.
10. Zivanovic, S., Buescher, R. W., & Kim, K. S. (2000). Textural changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition. *Journal of Food Science*, *65*(8), 1404–1408.

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LODOS ANAEROBIOS TRATADOS Y SU POTENCIAL USO COMO COMPONENTES DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE HORTALIZAS

Hugo López Villegas, Claudia Palomares Rodríguez, Carmen Ceciclia García Castillo, Verónica Janette Cedeño Garcidueñas, Guillermo Andrade Espinosa, Alberto Millán Montañez, Jazmin Jatziri Padilla Rojas, Alexander Sánchex Duque.

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Morelia.
hugo.lv@vmorelia.tecnm.mx

RESUMEN

El uso de lodos biológicos anaerobios tratados como componente de sustratos ha cobrado interés debido a su potencial aporte de materia orgánica y nutrimentos principalmente nitrógeno y fósforo, lo que hace relevante su aplicación en suelos agrícolas y forestales[1], no obstante en la actualidad no se cuenta con un tratamiento adecuado de los mismos, sin embargo al someterse a un proceso de estabilización se puede obtener un biosólido con grandes beneficios que puede ser reutilizado en actividades como lo es el caso de la agricultura como agregado de sustrato en la siembra de semillas de hortalizas. El objetivo del presente estudio fue caracterizar las propiedades del lodo residual el cual se elaboró, a partir de estiércol bovino (50%) y porcino (50%) además de aguas residuales del proceso de nixtamalización (nejayote) que permitieron lograr la obtención de un producto con características adecuadas para su uso en la producción vegetal. Para realizar el presente trabajo la metodología a seguir fue la siguiente: primero se deshidrató el lodo biológico para poder realizar las pruebas físico-químicas correspondientes mismas que fueron las siguientes, determinación de densidad aparente y relativa, pH, conductividad eléctrica, fosfatos (PO_4^{3-}), fósforo (P), calcio (Ca), calcio + magnesio (Ca + Mg), potasio (K), sodio (Na) y carbonatos (CO_3). Los resultados muestran la caracterización físico-química del lodo el cual presentó un color café en seco y café oscuro en húmedo que sugiere la presencia de compuestos orgánicos, la reacción del residuo fue marcadamente alcalina ,con valores de pH de 8.84 en agua y de 8.73 en $CaCl_2$ lo que indica que existen posibilidades de presentar problemas de disponibilidad de nutrientes, con respecto a la conductividad eléctrica el resultado fue de 1.7 dS/m evidenciando una alta concentración de sales solubles en el residuo, para el caso de la densidad aparente (0.61 g/cm^3) y la densidad real (1.43 g/cm^3) los resultados sugieren un material con potencial susceptibilidad a la compactación, aspecto que resulta relevante en la formulación de sustratos, por otra parte, el contenido nutrimental el material cuenta con presencia de fosfatos (PO_4^{3-}), fósforo (P), calcio (Ca), calcio + magnesio (Ca + Mg), potasio (K), sodio (Na) y carbonatos (CO_3). En conjunto, los resultados muestran que el lodo constituye una fuente potencial de bases intercambiables y potasio; sin embargo, la salinidad elevada y su reacción alcalina representan restricciones importantes que deben considerarse al definir la proporción en mezclas con otros sustratos para la siembra de semillas.

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de tratamiento anaerobio de las aguas residuales se genera un subproducto que dentro del proceso de tratamiento es importante, los lodos biológicos, sin embargo, al paso del tiempo estos son considerados residuos y por la frecuencia, así como volumen de generación son considerados complicados de manejar y disponer, ya que eso implica costo de transporte, además de que deben recibir un tratamiento para disminuir la carga patógena. Por esta razón, los lodos biológicos son considerados material de desecho, (Marambio & Ortega, 2003). Sin embargo, contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos patógenos, macro y micro nutrientes, metales pesados y agua (Cuevas *et al.,* 2006), lo que los hace un residuo susceptible a ser revalorizado.

Derivado de diversos estudios en los cuales se han investigado potenciales usos y tratamientos de los lodos anaerobios, una opción benéfica con el medio ambiente y principalmente con el suelo es que pueden aprovecharse en la agricultura (Ippolito *et al.* 2010), ya que dentro de sus beneficios se encuentran; presencia de especies químicas de N y P que son metabolizables, así como materia orgánica la cual incrementa la porosidad del suelo, estabilidad de agregados, retención de agua, el pH y la capacidad de intercambio catiónico(Minnini, *et al.,* 1987).

Por otra parte, los sustratos convencionales contribuyen al desarrollo y la productividad de diversos cultivos; sin embargo, presentan desventajas, tales como altos costos o bien impactos ambientales asociados a su extracción, lo que tiene un efecto significativo en los costos de producción y en el medio ambiente, por lo que resulta necesario evaluar y promover alternativas sostenibles que permitan reducir la dependencia de estos materiales.

El presente trabajo tuvo por objeto la caracterización físico-química de un lodo anaerobio tratado y su potencial uso como componente de sustratos para la producción de plántulas de hortalizas.

PARTE EXPERIMENTAL

Elaboración de lodo biológico

Dentro de los procesos anaerobios el lodo biológico es importante, debido a que para su elaboración este depende que tenga una buena calidad. Inicialmente se determinó que su elaboración sería a partir de la mezcla de estiércol de ganado porcino y vacuno. Posteriormente se llevó a cabo a través de la recolección de excretas de ganado porcino y vacuno, en una proporción 50-50 de cada desecho para luego incorporar agua en un volumen igual al de las excretas, de esta manera se realizó la mezcla dentro del tanque de almacenamiento (Figura 1).



Figura 1. Elaboración de lodo biológico

La alimentación de excretas al tanque se realizó de manera semanal hasta llenarlo a su máxima capacidad (60 L).
Posteriormente una vez que se obtuvo el lodo anaerobio, este recibió un tratamiento térmico en una estufa de calentamiento. El lodo fue colocado sobre charolas de aluminio y calentado a 80°C por 1 hora para eliminar los patógenos presentes en el mismo.
Posteriormente las muestras de lodo en las bandejas de aluminio (Figura 2) se dispusieron sobre bases de concreto con charolas de poliestireno dentro de un invernadero, en el cual se generó una temperatura de 50°C, con el objetivo de eliminar el agua presente en el lodo biológico.



Figura 2. Secado de muestra de lodo biológico

Una vez que el lodo fue secado, se le realizó un pulverizado y tamizado mediante un mazo y un tamiz de acero inoxidable (Figura 3) para eliminar impurezas y mejorar la calidad de la muestra.



Figura 3. Muestra de lodo biológico pulverizada y tamizada

Caracterización del lodo anaerobio

Se realizó la caracterización físico-química del lodo en el laboratorio de suelos del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, los parámetros determinados se muestran en la Tabla 1:

Análisis	*Parámetros determinados*
Físico	Textura, humedad, densidad y porosidad
Químico	pH, conductividad eléctrica y materia orgánica
Nutrimental	N, P, K, Ca y Mg

Tabla 1. Parámetros físicos y químicos determinados

Dichos parámetros fueron determinados de acuerdo con la normatividad mexicana aplicable y se realizó una repetición.

RESULTADOS

Caracterización física de lodos anaerobios

Se realizó una caracterización física evaluando los parámetros que se observan en la Tabla 2 donde se muestra que el lodo anaerobio tratado presenta textura franco-arenosa que representa un material ligero, buena aireación y drenaje, una densidad aparente de 0.61 g/cm^3 (poco compacto y liviano) condición ideal en sustratos, lo cual resulta benéfico para emplearlo como complemente de sustrato, también se observa una porosidad de 57.1% adecuada para uso hortícola, lo cual favorece que la raíz pueda desarrollarse y el agua pueda penetrar en el sustrato.

Por otra parte, se observa que la lámina de riego es de 1.1, lo que afecta directamente en maximizar la eficiencia de riego y evitar el estrés hídrico. Además, el color obscuro indica presencia elevada de materia orgánica, lo cual se menciona en la Tabla 3.

Análisis físico					
Granulometría (%)		**Constantes de humedad (%)**		**Color y densidades**	
Arcilla	9	Humedad a saturación	16	**Color**	
Limo	22	Capacidad de campo	9	En seco	Café rosado
Arena	69	Punto de marchitez permanente	5	En húmedo	Café muy obscuro
Clase textural	Franco-Arenoso	Humedad aprovechable	4	**Densidad (g/cm^3)**	
				D. aparente	0.61
Interpretación	suelo ligero	Lámina de riego (Prof. 20cm)	1.1	D. real	1.43
				Porosidad (%)	57.1

Tabla 2. Análisis físico del lodo

Caracterización química de lodos anaerobios

Por otra parte, se realizó a la par una caracterización química de los lodos anaerobios biológicos (Tabla 3), los resultados muestran valores de pH alto (alcalino) y CE (1.7 dS/m) posible problema de sales, con presencia de carbonatos (7 ppm) alto, materia orgánica (6.3 %) alto y P (32 ppm) adecuado elemento clave en el desarrollo inicial de raíces.

Es importante mencionar que el lodo biológico cuenta con características que podrían favorecer un cultivo de hortaliza, sin embargo, algunas de sus propiedades se salen de los valores esperados, por lo que se deberá contemplar durante su uso.

Análisis químico						
Análisis químicos	**Valor**	**Interpretación**	**Elemento**	**ppm**	**kg/ha**	**Interpretación**
pH en agua	8.8	Muy alcalino	Fósforo	32	55	Adecuado
pH en solución CaCl2	8.7	Muy alcalino	Potasio	2,213	322	Excesivo
C.E. (dS/m)	1.7	Pos.Prob. Sales	Calcio	3,000	7,500	Adecuado
Materia Orgánica (%)	6.3	Muy alto	Magnesio	1,920	4,800	Alto
Nitrógeno orgánico (kg/ha)	157.9	Muy alto	Carbonatos	7	18	Alto

Nitrógeno Anonc. (ppm)	-	No determinado	Nitróg. Mineral	-	-	No determinado
Elementos menores	**ppm**	**Interpretación**	**Cationes Intercambiables**	**meq/100 g**	**%**	**Interpretación**
Aluminio	0	No determinado	Potasio	5.7	14.7	Excesivo
Hierro	0	No determinado	Calcio	15	38.8	Insuficiente
Manganeso	0	No determinado	Magnesio	16	41.4	Insuficiente
Cobre	ND	No determinado	C.I.C.	36.7	-	Alta
Boro	ND	No determinado				

Tabla 3. Análisis químico

De acuerdo con Crippa, Zaccheo y Orfeo (2013) demostraron que digestatos anaerobios pueden sustituir parcialmente la turba en sustratos hortícolas, aunque señalan que altos valores de CE y baja agua fácilmente disponible pueden afectar la germinación si no se mezclan adecuadamente, por lo que se deberá cuidar la cantidad de agua que se agregará.

CONCLUSIONES

Los lodos anaerobios tratados poseen propiedades físicas adecuadas para su empleo como sustrato en la germinación de semillas de hortalizas, sin embargo, por sus propiedades químicas (baja retención de humedad y posible riesgo de salinidad), deberán considerarse para el empleo en mezclas con otros materiales orgánicos y previa evaluación química completa, además de llevar a cabo pruebas de germinación, con el objetivo de encontrar los porcentajes ideales de las mezclas con otros sustratos, como lo es el caso del peat moss (sustrato comercial).

BIBLIOGRAFÍA

1. Crippa, L., Zaccheo, P., & Orfeo, D. (2013). Use of digestate from anaerobic digestion as peat substitute in horticulture. Acta Horticulturae, 1013, 285–292. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.45
2. Cuevas, G., Blázquez, R., Martínez, F., & Walter, I. (2006). Composted MSW organic fraction and sewage sludge as soil amendment: Effects on humic acids and microbiological properties of soils. Bioresource Technology, 97(10), 123–130. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.003
3. Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., Paschke, M. W., & Brobst, R. B. (2010). Infrequent composted biosolids applications affect semi-arid grassland soils and vegetation. Journal of Environmental Management, 91(5), 1123–1130. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.002
4. Marambio, O., & Ortega, R. (2003). Uso y manejo de lodos residuales en suelos agrícolas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.
5. Medina, E., Rojas, N., Rodríguez, A. V. y Fabila, M.G. (2009). Análisis básico del reusó de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de Pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. Quivera, 11 (2), 35-51.
6. Mininni G., Santori M., (1987). Problems and Perpectives of sludge Utilization in Agriculture. Agriculture, Ecosystems and Environment, Elsevier Science Publishers B.V. 18, 291-311. https://doi.org/10.1016/0167-8809(87)90096-X.

MORFOMETRIA Y COMPOOSICION HISTOQUIMICA DE CUATRO VARIEDADES DE *Phaseolus Vulgaris L.*

Brenda Ramos Rocha, Jesús Castañeda Contreras, Sofia Loza Cornejo

Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara
brenda.rrocha@alumnos.udg.mx

RESUMEN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), es uno de los cultivos más antiguos. En México no solo representa un alimento básico, sino también un símbolo cultural, recurso económico y fuente clave de nutrición, ya que es una leguminosa rica en proteínas, carbohidratos, fibra y cuenta con compuestos bioactivos como antioxidantes y flavonoides. Actualmente se reconocen más de 70 variedades de frijol a nivel nacional, con una notable diversidad morfológica y bioquímica en todas sus variedades, las cuales se distinguen por su tamaño, forma, color del tegumento y composición química. En este trabajo se presenta un estudio comparativo de la morfometría y la composición histoquímica de cuatro variedades comerciales de frijol: peruano, flor de mayo, pinto y negro. En el análisis de morfometría se midieron los parámetros siguientes: longitud, ancho, grosor, peso individual, peso de 100 semillas, índice de forma e índice de compacidad (IC). Para los estudios de histoquímica, se realizaron cortes longitudinales y transversales de las semillas para observar y determinar cualitativamente la presencia de almidón, proteínas y lípidos mediante tinciones de Lugol, Sudán IV y azul negro de naftol. Los resultados mostraron que los valores promedio de longitud y ancho de semilla son mayores en la variedad peruano, siguiendo con la de flor de mayo, pinto y negro; mientras que en el grosor de orden creciente a decreciente son peruano, flor de mayo, negro y pinto. Para el peso de manera individual se encontró que el peruano es el que tuvo un mayor peso 0.512 g. El peso para las demás variedades fue de 0.2932 g en pinto, 0.2646 g en flor de mayo y 0.2329 en negro. En el peso para los grupos de 100 semillas, se mantuvo el mismo orden, siendo el frijol peruano el que tuvo mayor peso en grupo. En cuanto al índice de forma, las cuatro variedades tienen un valor mayor a 1.5 lo cual se interpreta que es una semilla alargada. Para los estudios del índice de compacidad, las variedades de flor de mayo y negro presentan un valor menor a 0.5 lo que se describe como IC medio que es una semilla equilibrada, por otro lado, las semillas de las variedades de peruano y pinto, tienen un valor mayor a 0.5, dando un IC alto, lo cual indicó una semilla compacta, gruesa con respecto a su longitud. Se encontró que todas las variedades tienen presencia de gránulos de almidón, pero en mayor cantidad las de la variedad peruano, seguido por la variedad pinto, flor de mayo y, variedad negra, respectivamente. La presencia de lípidos en semillas de *Phaseolus vulgaris* L., es relativamente baja, de las variedades analizadas solo se encontraron lípidos en el frijol peruano y pinto. Por otra parte, en todas las variedades de frijol estudiadas se encontraron proteínas, de mayor a menor cantidad, peruano, pinto, flor de mayo y negro. Se concluyó que las semillas más grandes presentaron una mayor cantidad de nutrientes, lo cual puede ser indicativo de una mejor germinación y mayor vigor en las plántulas.

INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo de gran relevancia histórica, cultural y nutricional en México, y su estudio morfométrico e histoquímico permite comprender mejor la diversidad y calidad de sus variedades comerciales. Parte de su importancia como alimento básico se debe a que es una fuente accesible de proteínas vegetales, carbohidratos, fibra, vitaminas y minerales, además que contiene bioactivos como antioxidantes, flavonoides y fitatos.

La diversidad genética de *Phaseolus vulgaris* L. en Mexico es notable ya que se conocen mas de 70 variedades de diferente tamaño, forma, color y composición química (Vargas-Vazquez, 2014).
Ciertas investigaciones han demostrado que parámetros como longitud, ancho, grosor y peso son indicadores confiables de la calidad del grano (Mex-Alvarez, 2021). Por otro lado, se destaca la

importancia de las técnicas histoquímicas, las cuales permiten identificar la distribución y abundancia de ciertos metabolitos o macronutrientes presentes en las semillas.

TEORÍA

La semilla de frijol es una legumbre con forma oblonga, ovalada o reniforme. Esta cubierta por una testa lisa y resistente. En su interior contiene un embrión y dos grandes cotiledones que almacenan nutrientes. Presenta una gran variedad de colores (Espinoza Bello, 2024).

Importancia socioeconómica

El frijol es uno de los cultivos de mayor importancia en Mexico, existen aproximadamente 150 especies de plantas de frijol, de las cuales 70 se encuentran en Mexico; la planta de frijol está posicionada como la leguminosa con frutos y semillas de mayor consumo humano (Gobierno de Mexico, 2023).

Morfometría

La morfometría de las semillas de frijol evalúa parámetros físicos como longitud, ancho, espesor y peso. Estas medidas varían significativamente según la variedad y domesticación, siendo fundamentales para la taxonomía, el mejoramiento genético y la evaluación de la calidad comercial. Estos parámetros influyen directamente en el vigor de la plántula al momento de la germinación (Mex-Alvarez, 2021).

Índices de forma y compacidad

Los índices de forma y compacidad son parámetros biométricos que relacionan las dimensiones de la semilla, para clasificar genotipos, asegurar la pureza varietal y predecir el vigor y la uniformidad de la germinación. En el índice de forma un valor > 1.5 tipifica morfológicamente a una semilla como alargada. El índice de compacidad detalla si una semilla es compacta, gruesa (> 0.5) o equilibrada (< 0.5) (Mohsenin, 1986).

Histoquímica

La histoquímica vegetal es una disciplina que combina la botánica, química y microscopia para identificar y localizar compuestos químicos (metabolitos, lípidos, proteínas, carbohidratos) directamente en los tejidos de semillas y plantas. En el estudio de leguminosas como el frijol, las tinciones histoquímicas son fundamentales para evaluar la distribución de las principales macromoléculas de reserva energética y estructural.

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención del material

Las semillas se obtuvieron adquiriéndolas en el mercado. Para seleccionas las semillas se observaron en el estereoscopio (Leica EZ4), para verificar que no presentaran daños, es decir, rompimiento en la testa o coloración diferente.

Morfometría

Se seleccionaron 100 semillas de cada variedad peruano, flor de mayo, pinto y negro.
Con un vernier se realizaron las mediciones de longitud, ancho y grosor. Posteriormente se pesó cada una de las semillas. Luego de realizar las mediciones se calcularon los índices de forma y compacidad, con las siguientes formulas:

Índice de forma:

$$I_f = \frac{L}{W} \qquad (1)$$

Donde:
L = Longitud de la semilla (eje mayor)
W = Ancho de la semilla (eje menor)

Índice de compacidad

$$I_c = \frac{G}{L} \qquad (2)$$

Donde:
G = Grosor de la semilla
L = Longitud de la semilla (eje mayor)

Histoquímica
Se remojaron las semillas durante un día previamente a su corte, se realizaron cortes delgados longitudinales (sobre el eje mayor) y transversales (sobre el eje menor).
Luego, a cada corte de las cuatro variedades de frijol, se les realizo la tinción correspondiente dependiendo del tipo de metabolito a observar, lugol para almidón, azul negro para proteínas y Sudán IV en lípidos.
Para las micrografías se utilizó un microscopio con los objetivos de 4X, 10X y 40X.

RESULTADOS

El análisis biométrico de las cuatro variedades comerciales de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) mostró diferencias notables en sus dimensiones físicas y peso, destacando la variedad peruano como la de mayores dimensiones generales, mientras que la variedad negro presento lo valores mas bajos en la mayoría de los parámetros evaluados. Esto se muestra en la Tabla 1.

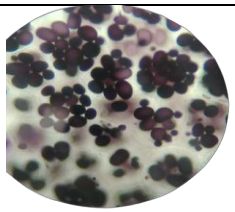
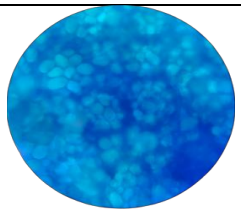
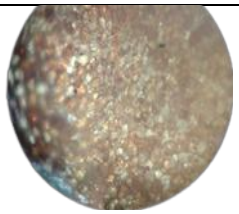
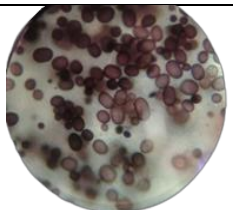
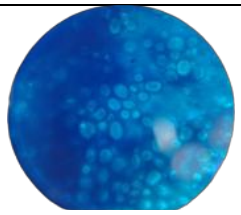
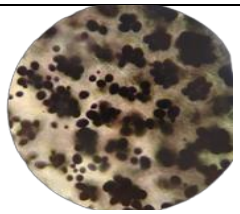
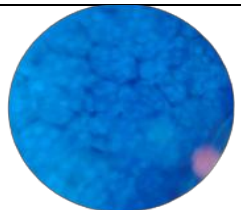
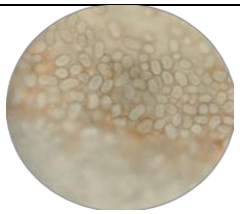
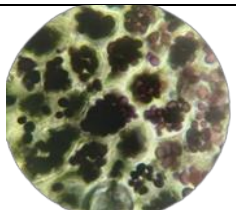
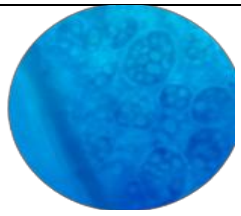
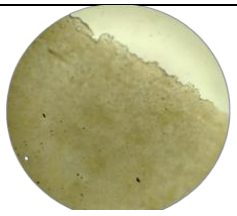
Tabla 1. Comparación de medias de los parámetros morfológicos de *Phaseolus vulgaris* L. por variedad.

Parámetro	Peruano	Flor de mayo	Pinto	Negro
Longitud (mm)	12.34	10.89	11.81	10.68
Ancho (mm)	7.84	7.04	6.74	6.55
Grosor (mm)	6.39	5.37	4.70	4.72
Peso individual (g)	0.51	0.26	0.29	0.23
Peso de 100 semillas (g)	51.2	26.46	29.32	23.29
Índice de forma	1.58	1.55	1.75	1.63
Índice de compacidad	0.52	0.49	0.69	0.44

De acuerdo con los resultados registrados en la Tabla 1 para los parámetros longitud y ancho, los valores promedio siguieron un orden decreciente estricto desde la variedad peruano hasta la variedad negro. La variedad peruano exhibió la mayor longitud y ancho, seguido en orden descendente por flor de mayo, pinto y negro con las menores dimensiones. En cuanto al grosor, a diferencia del patrón anterior, el orden decreciente para el espesor de la semilla se ordeno de la siguiente manera, peruano, flor de mayo, negro y pinto. Para los pesos individuales y de grupo, estos resultados guardaron una relación directa con el tamaño. En el parámetro siguiente de índice de forma, las cuatro variedades registraron un valor mayor a 1.5 lo que las clasifica bajo una morfología alargada, siendo la variedad pinto la que posee la forma más elongada. Y para el último parámetro de la tabla, el índice de compacidad permitió segmentar las variedades en dos grupos, I_C con valor mayor a 0.5 con las variedades pinto y peruano, lo que interpreta como semillas de estructura más compacta y gruesa, respecto a su longitud. En las variedades de flor de mayo y negro, los valores de I_C resultaron inferiores a 0.5, lo que las describe como semillas equilibradas.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de las tinciones histoquímicas.

Tabla 2. Micrografías de histoquímica en las cuatro variedades de *Phaseolus vulgaris* L., en las que se muestra la identificación de almidón, proteínas y lípidos.

	Almidón	**Proteínas**	**Lípidos**
Peruano			
Flor de mayo			
Pinto			
Negro			

Las tinciones especificas aplicadas a los cortes histológicos revelaron la distribución y abundancia relativa de las reservas nutricionales (almidón, proteínas y lípidos) en las semillas.

En el caso de almidón, se identificó la presencia de gránulos en las cuatro variedades comerciales de frijol, destacando una mayor cantidad en la variedad peruano, seguida en orden decreciente por las variedades pinto, flor de mayo y negro. Para la presencia de proteínas, todas las variedades estudiadas resultaron positivas, la abundancia relativa de mayor a menor concentración fue en peruano, pinto, flor de mayo y negro. En cuanto a los lípidos, su presencia fue demasiado baja en comparación con los metabolitos anteriores, en donde se observa presencia es en la variedad peruano y pinto.

CONCLUSIONES

Se determinó de manera concluyente que las características físicas, las dimensiones morfométricas y el peso de las semillas de *Phaseolus* L. están directamente relacionados con su capacidad de almacenamiento y reserva nutricional. La variedad de peruano destaca significativamente sobre las demás debido a su mayor tamaño, peso individual y de grupo, así como presentar el mayor contenido de almidón, proteínas y lípidos. En el análisis histoquímico se confirmó que, aunque el almidón y las proteínas son componentes de reserva en las cuatro variedades, existen diferencias cualitativas. La combinación de morfometría e histoquímica en las variedades de peruano y pinto sugiere que estas semillas podrían poseer un rendimiento fisiológico optimo, lo que podría traducirse en ventajas agronómicas, tales como una respuesta germinativa más eficiente y un mayor vigor de las plántulas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Espinoza Bello, J. E. (2024). Manual tecnico para el manejo agronomico del cultivo de frijol (Phaseolus vulgaris). Managua, Nicaragua.
2. Gobierno de Mexico. (16 de Agosto de 2023). Obtenido de https://www.gob.mx/agricultura%7Cpuebla/articulos/frijol-el-mejor-aliado-de-la-alimentacion-342707
3. Lo Turco, V., Potortì, A. G., Rando, R., Ravenda, P., Dugo, G., & Di Bella, G. (2016). Functional properties and fatty acids profile of different beans varieties. Natural Product Research, 1–6.
4. Mex-Alvarez, R. M.-Q.-N.-M.-P. (2021). Caracterizacion morfometrica de Phaseolus vulgaris en Campeche, Mexico. CENIC Ciencias Biologicas.
5. Mohsenin, N. N. (1986). Physical Porperties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. Gordon and Breach Science Publishers.
6. Samantha Rodríguez Villagómez 2022. Desarrollo, Caracterización Fisicoquímica Y Nutracéutica De Un Explotado Tipo Palomita Utilizando Frijol Común (Phaseolus Vulgaris L.) Variedad Reventón. Tesis Maestria En Ciencia Y Tecnología De Alimentos. Facultad De Quimica, Universidad autónoma de Querétaro.
7. Vargas-Vazquez, M. L.-M.-C. (2014). Diversidad morfologica del frijol (Phaseolus vulgaris L.) en Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Agricolas , 1215-1227.

EL LITIO AUMENTA LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILAS EN HOJAS DE MAÍZ (*Zea Mays* L.) cv. HS-2

María de la Luz Buendía-Valverde, Fernando Carlos Gómez-Merino, Libia Iris Trejo-Téllez

Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
buendia.luz@colpos.mx

RESUMEN

El litio (Li) es considerado un elemento benéfico, a bajas concentraciones promueve la germinación y el crecimiento fisiológico de plantas superiores. Sus efectos son determinados por la concentración y el tiempo de exposición. Aunque se han atribuido diversos efectos positivos del Li en plantas, es necesario continuar estudiando su comportamiento para conocer su impacto en los sistemas agrícolas. Por otra parte, los pigmentos fotosintéticos tienen la facultad de captar energía lumínica y transformarla en energía química disponible para las plantas, esta absorción puede depender de la concentración de clorofilas y carotenoides. Por lo anterior, el presente estudio evaluó el efecto que provoca el Li en la concentración de clorofilas y carotenoides de hojas de maíz. Para lo cual, plántulas sanas de maíz cv. HS-2 de 15 d se establecieron en un sistema en hidroponía en recipientes de plástico de 4 L con tapas y orificios, con solución universal Steiner, ajustando el pH a 5.5 ± 0.2, reponiendo el agua evaporada con agua destilada diariamente y renovando la solución cada semana. La solución se oxigenó cada 3 h por 15 min, después de una semana de aclimatación, los tratamientos de 0, 75, 150, 225 y 300 µM Li se añadieron a la solución nutritiva a partir de Li_2MoO_4 durante cuatro semanas. Una vez concluido el tiempo, las plántulas se retiraron de los recipientes, las hojas frescas se lavaron con agua destilada. Se pesaron 100 mg de tejido en un tubo de microcentrífuga, se agregaron 1800 µL de metanol y se dejó reposar la muestra 24 h a -20 °C, los tubos se centrifugaron a 10 000 rpm, el extracto sobrenadante se leyó a 666, 653 y 470 nm. Se obtuvo la concentración de clorofila a, clorofila b y carotenoides. A los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$). Los resultados muestran que el tratamiento con 150 µM Li_2MoO_4 incrementó la concentración de clorofila *a*; 150 y 300 µM Li_2MoO_4 aumentaron la concentración de clorofila *b* y las dosis de 75 y 150 µM Li_2MoO_4 incrementaron la concentración de clorofilas totales. Se concluye que el litio en su forma química de Li_2MoO_4, incrementa la concentración de clorofilas en hojas de maíz cv. HS-2.

INTRODUCCIÓN

El litio (Li) es un elemento descubierto en 1817, es el metal menos denso que existe, y uno de los más “críticos” para la sociedad moderna, ya que es empleado en la fabricación de muchos de los dispositivos electrónicos que se utilizan en la vida diaria, además, su creciente uso en la industria muestra una tendencia de uso que continuará para las próximas décadas (Aral *et al*, 2011; Török *et al*., 2021).

Su papel biológico en el ciclo de vida de los organismos no es claro, aunque se considera que tiene gran potencial como micronutriente en el ser humano (Baran, 2019). El carbonato de litio (Li_2CO_3) es uno de los fármacos más utilizados en tratamientos psiquiátricos (Szklarska & Rzymski, 2019).

La entrada de Li en el suelo ocurre principalmente por la meteorización de minerales sedimentarios, donde el Li será relativamente móvil en comparación con otros oligoelementos presentes en la solución del suelo. En plantas, el Li posee efectos diferenciales respecto a su tolerancia, por ejemplo, los cítricos son sensibles a la presencia de Li, mientras que algunas hortalizas como la lechuga toleran hasta 20 mg Li kg^{-1} (Robinson *et al*., 2018).

Aunque el Li no ha sido considerado un elemento esencial, se encuentra en cantidades traza en la mayoría de las plantas, se ha establecido que concentraciones relativamente altas de Li causan

toxicidad; sin embargo, cuando se suministra a dosis bajas se pueden presentar efectos positivos, cabe mencionar que muchos de estos efectos se encuentran dados por el tiempo de exposición (Buendía-Valverde *et al*., 2024; Garcia-Daga *et al*., 2025).

Por otra parte, los pigmentos fotosintéticos tienen la facultad de captar energía lumínica y transformarla en energía química disponible para las plantas, esta absorción puede depender de la concentración de clorofilas y carotenoides (Reol, 2003). Evaluar la concentración de clorofilas en plantas es determinante para conocer el estado de salud y nutrimental de las plantas, además de ser una técnica rápida, no destructiva y sensible, nos permite detectar efectos de daño en el aparato fotosintético ante la presencia de distintos tipos de estrés abiótico como temperatura, sequía, salinidad, metales pesados, herbicidas y compuestos inorgánicos (González *et al*., 2008).
Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del litio, suministrado en forma de Li_2MoO_4, en la concentración de clorofila a, clorofila b y clorofilas totales en plantas de maíz (*Zea mays* L.) cv. HS-2 cultivadas en hidroponía.

PARTE EXPERIMENTAL

Se germinaron semillas de maíz del cultivar HS-2 en una charola de unicel de 200 cavidades, después de 15 d, las plántulas sanas se establecieron bajo condiciones de invernadero con temperaturas promedio de 32 °C en el día y 15 °C por la noche, el sistema en hidroponía consistió en recipientes de plástico de 4 L con tapas, orificios y hule espuma como soporte para las plántulas, usando solución universal Steiner al 35% y ajustando diariamente el pH a 5.5 ± 0.2 y reponiendo el agua evaporada con agua destilada diariamente, la solución nutritiva se oxigenó ocho veces al día (cada 3 h por 15 min), después de una semana de aclimatación, se utilizó la solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) al 75%, añadiendo los tratamientos con Li_2MoO_4 (0, 75, 150, 225 y 300 µM) a la solución durante cuatro semanas.

Una vez concluido el tiempo, las plántulas se retiraron de los recipientes, las hojas frescas se lavaron con agua destilada, se pesaron 100 mg de tejido fresco previamente molido con nitrógeno líquido, la muestra se colocó en un tubo de microcentrífuga, se agregaron 1800 µL de metanol frío y se dejó reposar la muestra 24 h a -20 °C, los tubos se centrifugaron a 10000 rpm, el extracto sobrenadante se leyó a 666, 653 y 470 nm en un espectrofotómetro (SYNERGY2, BIOTEK, Winooski, Vermont, EE. UU.). Con las lecturas de las absorbancias se determinó la concentración de clorofila a, clorofila b y clorofilas totales con las siguientes fórmulas (Sumanta *et al.,* 2014):

$$\boldsymbol{Clorofila\ a} = (\mathbf{16.72} * \boldsymbol{absorbancia\ a\ 666\ nm}) - (\mathbf{3.62} * \boldsymbol{absorbancia\ a\ 653\ nm})$$
$$\boldsymbol{Clorofila\ b} = (\mathbf{34.09} * \boldsymbol{absorbancia\ a\ 653\ nm}) - (\mathbf{15.28} * \boldsymbol{absorbancia\ a\ 666\ nm})$$
$$\boldsymbol{Clorofilas\ totales} = (\boldsymbol{clorofila\ a}) + (\boldsymbol{clorofila\ b})$$

A partir de los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey ($P \leq 0.05$). usando el software SAS (SAS, 2011).

RESULTADOS

En comparación con el testigo (0 µM Li_2MoO_4), los cuatro tratamientos con Li incrementaron la concentración de clorofila a, siendo significativo solo el tratamiento de 150 µM Li_2MoO_4, el cual incrementó 29 % la concentración de clorofila a (**Figura 1**).

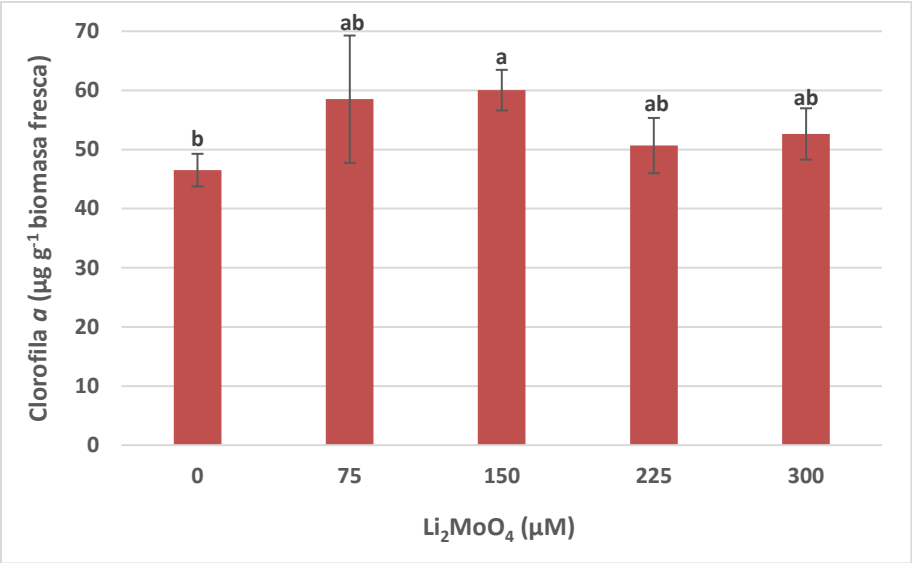


Figura 1. Concentración de clorofila a en hojas de plantas de maíz del cultivar HS-2 tratadas con Li_2MoO_4 durante 28 d. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey ($P \leq 0.05$).

La concentración de clorofila b se incrementó al aplicar los tratamientos con Li_2MoO_4, presentándose incrementos de 52 y 47% con las concentraciones de 150 y 300 µM Li_2MoO_4, respectivamente, en comparación con el testigo (**Figura 2**).

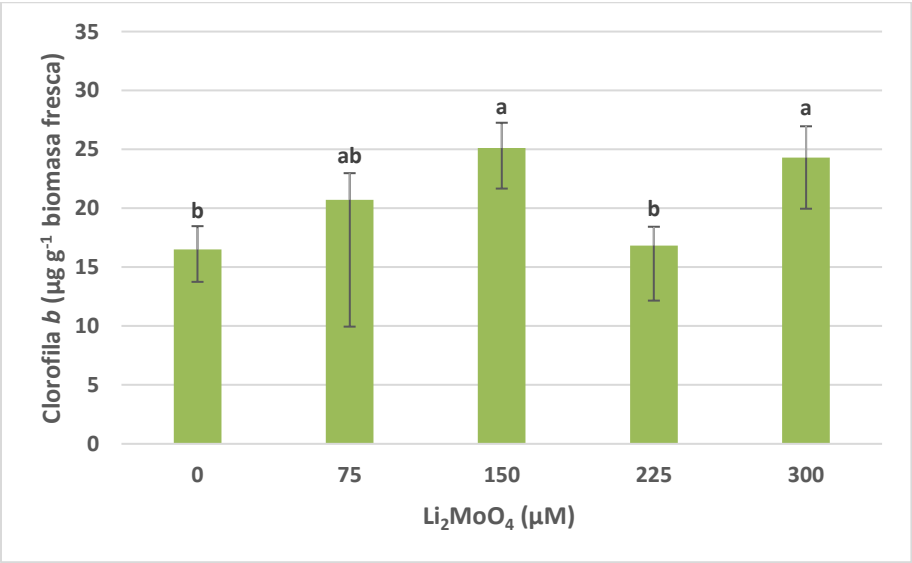


Figura 2. Concentración de clorofila b en hojas de plantas de maíz del cultivar HS-2 tratadas con Li_2MoO_4 durante 28 d. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$).

La concentración de clorofilas totales se incrementó al aplicar los cuatro tratamientos con Li_2MoO_4. Los incrementos de 26 y 35% con los tratamientos de 75 y 150 µM Li_2MoO_4, respectivamente, fueron significativamente superiores al tratamiento testigo (**Figura 3**).

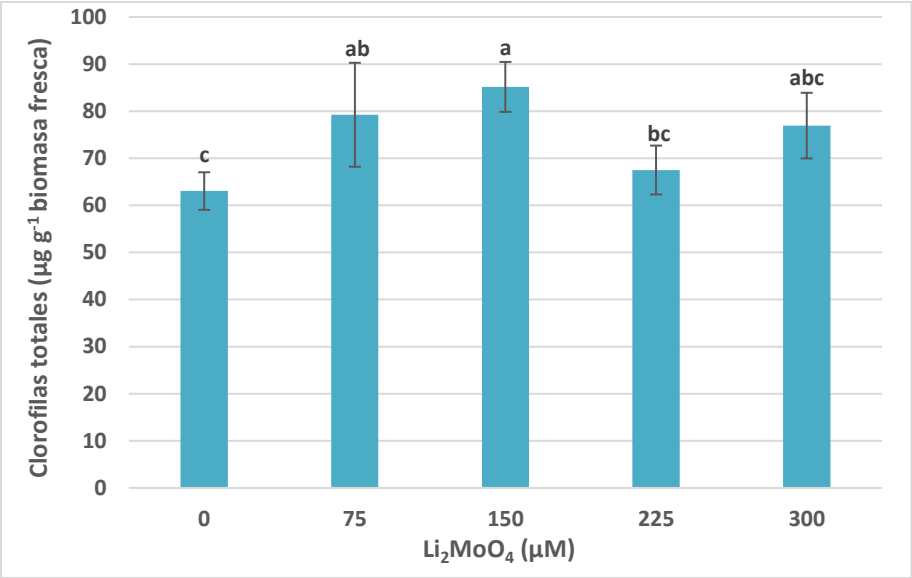


Figura 3. Concentración de clorofilas totales en hojas de plantas de maíz del cultivar HS-2 tratadas con Li_2MoO_4 durante 28 d. Medias ± DE con letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Los resultados sugieren que el Li puede favorecer la concentración de clorofilas en hojas de maíz. Se ha documentado que, a bajas concentraciones, este elemento ejerce efectos positivos en diversas variables fisiológicas de las plantas. Por ello, el Li es considerado un elemento benéfico, cuya absorción en cantidades mínimas puede contribuir al adecuado funcionamiento de distintos procesos metabólicos y fisiológicos (Szklarska & Rzymski, 2019).

CONCLUSIONES

La aplicación de Li_2MoO_4 incrementó la concentración de clorofilas en hojas de maíz cv. HS-2, particularmente a concentraciones de 75 y 150 µM. Los resultados sugieren que el litio puede desempeñar un papel benéfico en la fisiología vegetal al estimular componentes relacionados con la capacidad fotosintética. No obstante, se requieren estudios adicionales para comprender los mecanismos fisiológicos involucrados y definir los rangos de concentración adecuados para su uso en sistemas agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Steiner, “The universal nutrient solution. 6th international congress on soilless culture”. Wageningen, The Netherlands. 1984, pp. 633-650
2. A. I. Török, A. Moldovan, E. A. Levei, O. Cadar, C. Tănăselia, O. T. Moldovan, “Assessment of lithium, macro-and microelements in water, soil and plant samples from karst areas in Romania”, Materials, Vol. 14, 14, 4002, 2021.
3. B. H. Robinson, R. Yalamanchali, R. Reiser, N. M. Dickinson, “Lithium as an emerging environmental contaminant: Mobility in the soil-plant system”, Chemosphere, Vol. 197, 2018, pp. 1-6.
4. D. Szklarska, P. Rzymski, “Is lithium a micronutrient? From biological activity and epidemiological observation to food fortification”, Biol. Trace Elem. Res., Vol. 189, 1, 2019, pp. 18-27.
5. E. J. Baran, “Lithium in plants. In Plant Abiotic Stresses”, Physiological Mechanisms Tools and Regulation, 1st ed.; Hemantaranjan, A., Ed.; Scientific Publishers: New Delhi, India, 2019, pp. 151–162.

6. E. M. Reol, “Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis”, Ecosistemas, Vol. 12, 1, 2003.
7. H. Aral, A. Vecchio-Sadus, “Lithium: Environmental Pollution and Health Effects”, in Encyclopedia of Environmental Health”, 1st ed. Nriagu, J.O., Ed.; Elservier: Amsterdam, The Netherlands, 2011, pp. 499–508.
8. M. L. Buendía-Valverde, F. C. Gómez-Merino, Y. L. Fernández-Pavía, R. A. Mateos-Nava, L. I. Trejo-Téllez, “Lithium: An element with potential for biostimulation and biofortification approaches in plants”, Horticulturae, Vol. 10,101022, 2024.
9. M. S. González, V. H. Perales & A. M. O. Salcedo, “La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas”. Rev. Educ. Bioquímica, Vol. 27, 4, 2008, pp. 119-129.
10. N. Sumanta, C. I. Haque, J. Nishika, R. Suprakash, “Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents”, Res. J. Chem. Sci., Vol. 4, 9, 2014, pp. 63-69.
11. SAS Institute Inc. SAS/STAT Users Guide. Version 9.3. SAS Institute Inc., 2011, Cary, N. C., USA.
12. S. Garcia-Daga, S. Fischer, M. Gilliham, “Lithium in plants”, New Phytol., Vol. 248, 2025, pp. 1639-1654.

PRUEBAS DE DERMATOMICOSIS EN CANINOS Y SU ESTUDIO DE PREVALENCIA

Angyel Hernández Bulbarela, María Liliana Hernández Pérez

Universidad Interserrana Del Estado de Puebla Chilchotla.
20239303@uich.edu.mx, maría_hernandez@uich.edu.mx

RESUMEN

La dermatomicosis representa la micosis superficial más frecuente en la medicina veterinaria y medicina humana, destacando por su carácter contagioso y significativo potencial zoonótico. En caninos, los agentes predominantes incluyen a *Microsporum canis*, *Nannizzia gypsea y Trichophyton mentagrophytes*. El control de la enfermedad se ve obstaculizado por portadores asintomáticos que actúan como reservorios, facilitando la transmisión hacia humanos, con tasas de contagio reportadas de hasta el 15% en propietarios. El diagnóstico certero es crucial para evitar el sobrediagnóstico y asegurar el éxito terapéutico. Para este estudio se utilizó un enfoque experimental, descriptivo y transversal; para la toma de muestras se implementó un diseño completamente al azar y las muestras fueron realizadas y analizadas. Se evaluaron 10 caninos criollos en situación de calle del municipio de Rafael J. García, Chilchotla, Puebla, sin antecedentes clínicos conocidos ni lesiones dérmicas aparentes. Las muestras fueron obtenidas mediante raspado cutáneo y cepillado con hisopos estériles, transportadas en tubos estériles y procesadas antes de 24 horas. El aislamiento se realizó en agar Papa Dextrosa (PDA) incubado durante cinco días a temperatura ambiente. En el 90% de las muestras se observó crecimiento fúngico, destacando colonias pigmentadas de color naranja presentes en el 70% de los casos. Mediante observación microscópica se identificaron estructuras compatibles con Microsporum spp. y Trichophyton spp. Además, se registró una elevada presencia de *Malassezia pachydermatis* en más del 50% de las muestras, dificultando la detección temprana de dermatofitos. Los resultados evidencian una alta prevalencia de hongos con importancia veterinaria y zoonótica, destacando la necesidad de implementar estrategias de vigilancia epidemiológica bajo el enfoque de “Una Salud”.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades micóticas superficiales constituyen un problema de importancia en la salud animal y humana debido a su amplia distribución y capacidad de transmisión entre especies. Entre ellas, la dermatomicosis destaca por afectar tejidos queratinizados como piel, pelo y uñas, siendo causada principalmente por hongos dermatofitos pertenecientes a los géneros *Microsporum*, *Trichophyton* y *Nannizzia* (Chermette et al., 2008; Scott et al., 2013).

Los perros desempeñan un papel relevante en la epidemiología de estas infecciones, ya que pueden actuar como portadores asintomáticos y representar una fuente constante de contagio para otros animales y para el ser humano (Weese & Fulford, 2011). La presencia de animales en situación de calle incrementa este riesgo debido a las condiciones ambientales, nutricionales y sanitarias a las que se encuentran expuestos, favoreciendo la persistencia y diseminación de los dermatofitos en el ambiente (Chermette et al., 2008; Quinn et al., 2011).

La identificación temprana de dermatofitos es esencial para establecer medidas de control adecuadas y reducir el impacto sanitario de estas enfermedades. Sin embargo, el diagnóstico puede verse limitado por la presencia de otros microorganismos que compiten durante el cultivo, dificultando el aislamiento de los agentes etiológicos. Por ello, el empleo de técnicas diagnósticas adecuadas y la evaluación morfológica de las colonias son herramientas fundamentales para la confirmación de la enfermedad (Moriello, 2014; Moriello et al., 2017).

El objetivo de esta investigación fue aislar e identificar morfológicamente hongos dermatofitos presentes en caninos en situación de calle del municipio de Rafael J. García, Chilchotla, Puebla, así como evaluar su posible relevancia epidemiológica dentro del contexto de salud pública y medicina veterinaria. La información generada contribuirá al conocimiento de los agentes fúngicos presentes en esta población animal y permitirá fortalecer las estrategias de vigilancia, prevención y control de las dermatofitosis de importancia zoonótica (Weese & Fulford, 2011; Quinn et al., 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio
La investigación se desarrolló en el municipio de Rafael J. García, perteneciente a Chilchotla, Puebla, México. La zona presenta condiciones ambientales favorables para el desarrollo de microorganismos fúngicos debido a sus características climáticas y presencia constante de animales en libre tránsito.

Diseño experimental
Se utilizó un enfoque experimental, descriptivo y transversal. El muestreo se realizó bajo un diseño completamente al azar. Todas las muestras fueron procesadas y analizadas con la finalidad de garantizar la confiabilidad de los resultados.

Selección de animales
Se seleccionaron diez caninos criollos en situación de calle con edades comprendidas entre tres meses y edad adulta. Debido a su condición de abandono no fue posible obtener antecedentes clínicos. Los animales seleccionados no presentaban lesiones dérmicas evidentes al momento de la toma de muestras.

Obtención de muestras
Las muestras fueron recolectadas mediante raspado cutáneo superficial y cepillado utilizando hisopos estériles. Posteriormente fueron colocadas en tubos estériles para su transporte a temperatura ambiente hasta el laboratorio.

Procesamiento microbiológico
Las muestras fueron procesadas dentro de las primeras 24 horas posteriores a su recolección. El aislamiento se realizó mediante siembra en placas con agar Papa Dextrosa (PDA). Los cultivos fueron incubados a temperatura ambiente durante cinco días.

Evaluación macroscópica y microscópica
Las colonias desarrolladas fueron evaluadas considerando características morfológicas como color, textura, velocidad de crecimiento y pigmentación del medio. Posteriormente se realizaron observaciones microscópicas para identificar estructuras reproductivas compatibles con dermatofitos. Como prueba complementaria se utilizó la lámpara de Wood para la evaluación de fluorescencia.



Ilustración 1: Donante de muestra.



Ilustración 2: Donante de muestra.

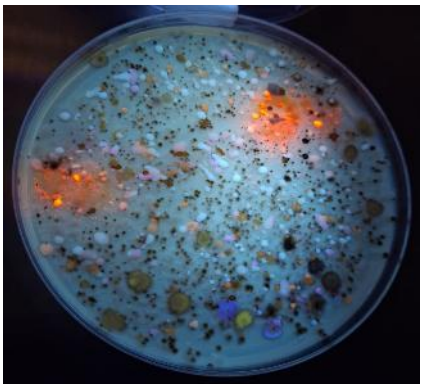


Ilustración 3: Placa de agar PDA, placa numero 9

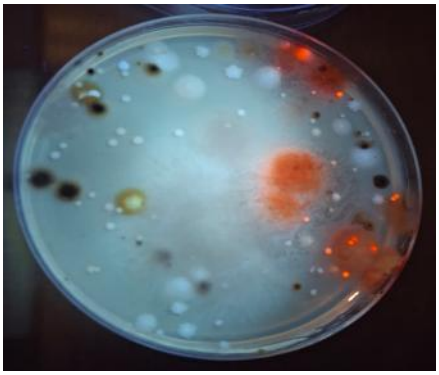


Ilustración 4: Placa de agar PDA, placa numero 2

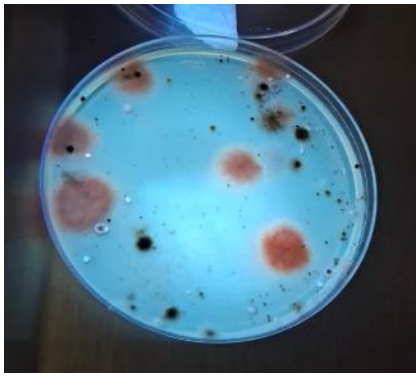


Ilustración 5: Placa agar PDA, placa número 3.

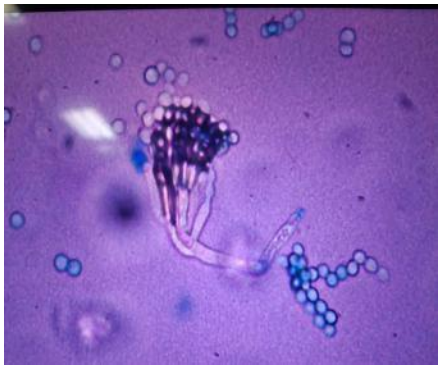


Ilustración 6: Posible identificación de Penicillium spp.



Ilustración 7: Posible identificación de Aspergillus spp.

Muestra	Prevalencia
Perro 1	Si
Perro 2	Si
Perro 3	Si
Perro 4	Si
Perro 5	Si
Perro 6	No
Perro 7	Si
Perro 8	Si
Perro 9	Si
Perro 10	Si

Ilustración 8: Tabla de prevalencia basada en las muestras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron que el 90% de las muestras presentó crecimiento fúngico, lo que evidencia una alta exposición de los perros en situación de calle a microorganismos presentes en el ambiente. Este hallazgo coincide con lo reportado por Scott, Miller y Griffin (2013), quienes señalan que los animales que viven en condiciones sanitarias deficientes tienen una mayor probabilidad de albergar hongos oportunistas y dermatofitos en la piel y el pelaje.

La variedad de colonias observadas durante el cultivo pone de manifiesto la complejidad del microbiota fúngico presente en estos animales. De acuerdo con Quinn et al. (2011), la piel funciona como un ecosistema dinámico donde conviven microorganismos benéficos, oportunistas y potencialmente patógenos. En este estudio destacó la presencia de un hongo pigmentado de color

naranja intenso en el 70% de las muestras, lo que sugiere una amplia distribución de ciertas especies ambientales en la zona de estudio. Sin embargo, para determinar su identidad con precisión serían necesarias pruebas complementarias.

Uno de los hallazgos más importantes fue la observación microscópica de estructuras compatibles con los géneros Microsporum y Trichophyton, reconocidos como los principales causantes de dermatofitosis en perros y otros animales domésticos (Scott et al., 2013). Este resultado resulta relevante porque los animales muestreados no presentaban lesiones cutáneas visibles, lo que respalda la posibilidad de que actúen como portadores asintomáticos. Rodríguez Beltrán (2021) menciona que esta condición favorece la permanencia de los dermatofitos en la población animal y dificulta su control epidemiológico.

También se observó un crecimiento abundante de levaduras compatibles con Malassezia pachydermatis en más de la mitad de las muestras. Aunque esta levadura forma parte del microbiota normal de la piel canina, su rápido desarrollo en los medios de cultivo puede dificultar el aislamiento de otros hongos de interés diagnóstico, especialmente dermatofitos (Quintero Vargas, 2020). Esta situación fue evidente durante el procesamiento de algunas muestras, donde el crecimiento de levaduras predominó sobre otros microorganismos.

Un caso particularmente interesante fue el de un cachorro de aproximadamente tres meses de edad, en el que se identificaron ocho morfologías fúngicas distintas. Este hallazgo refleja el alto grado de exposición ambiental al que pueden estar sometidos los animales jóvenes que viven en condiciones de abandono. Según Chaguay-Villamar (2020), la inmadurez del sistema inmunológico durante las primeras etapas de vida puede favorecer la colonización por una mayor diversidad de microorganismos.

La frecuencia de crecimiento fúngico observada fue superior a la reportada en diversos estudios sobre dermatofitosis canina. Esta diferencia podría explicarse por las características específicas de la población estudiada, compuesta exclusivamente por perros en situación de calle. La exposición constante a suelo contaminado, materia orgánica en descomposición y contacto frecuente con otros animales favorece la adquisición y dispersión de esporas fúngicas (Rodríguez Beltrán, 2021).

Desde la perspectiva de salud pública, los hallazgos adquieren especial importancia debido al potencial zoonótico de los dermatofitos identificados. Weese y Fulford (2011) destacan que los perros pueden funcionar como reservorios de microorganismos capaces de transmitirse a los seres humanos mediante el contacto directo o indirecto. Esta situación representa un riesgo para la población, particularmente para niños, adultos mayores y personas inmunocomprometidas.

En conjunto, los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de abordar este tipo de enfermedades bajo el enfoque de Una Salud, que reconoce la estrecha relación existente entre la salud animal, la salud humana y el medio ambiente. La vigilancia epidemiológica de poblaciones caninas en situación de calle puede contribuir significativamente a la prevención y control de enfermedades zoonóticas. Asimismo, futuras investigaciones apoyadas en técnicas moleculares permitirían identificar con mayor precisión las especies presentes y comprender mejor su papel dentro de la epidemiología local.

CONCLUSIONES

El cultivo microbiológico permitió detectar una alta prevalencia de hongos con importancia veterinaria y zoonótica en caninos en situación de calle del municipio de Rafael J. García, Chilchotla, Puebla. El 90% de las muestras presentó crecimiento fúngico, observándose estructuras compatibles con dermatofitos pertenecientes a los géneros Microsporum y Trichophyton.

La presencia de Malassezia pachydermatis en más del 50% de las muestras representó un factor que dificultó la detección temprana de dermatofitos debido a su rápido crecimiento en cultivo.

Los resultados demuestran que los perros aparentemente sanos pueden actuar como reservorios de microorganismos potencialmente patógenos para otros animales y para el ser humano.

Se recomienda ampliar el tamaño de muestra e incorporar técnicas moleculares para confirmar la identidad de las especies aisladas y fortalecer la vigilancia epidemiológica bajo el enfoque de Una Salud.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chaguay-Villamar, K. (2020). *Caso clínico de dermatología*. Revista Oficial de AVEPA.
2. Chermette, R., Ferreiro, L., & Guillot, J. (2008). *Dermatophytoses in animals*. *Mycopathologia, 166*(5-6), 385–405.
3. Moriello, K. A. (2014). *Diagnostic techniques for dermatophytosis*. *Clinics in Dermatology, 32*(2), 226–230.
4. Moriello, K. A., Coyner, K., Paterson, S., & Mignon, B. (2017). *Diagnosis and treatment of dermatophytosis in dogs and cats*. *Veterinary Dermatology, 28*(3), 266–e68.
5. Quinn, P. J., Markey, B. K., Leonard, F. C., FitzPatrick, E. S., Fanning, S., & Hartigan, P. J. (2011). *Veterinary Microbiology and Microbial Disease*. Wiley-Blackwell.
6. Quintero Vargas, L. M. (2020). *Guía de Diagnóstico de Dermatomicosis*. Universidad de Córdoba.
7. Rodríguez Beltrán, L. (2021). *Dermatofitosis: ¿Realidad clínica o tendencia en caninos?*. *Clínica Dermatológica Veterinaria (Clinvet)*.
8. Scott, D. W., Miller, W. H., & Griffin, C. E. (2013). *Muller and Kirk's Small Animal Dermatology*. Elsevier.
9. Weese, J. S., & Fulford, M. B. (2011). *Companion Animal Zoonoses*. Wiley-Blackwell.

POTENCIAL EFECTO BIOESTIMULANTE DE *Azospirillum Brasilense* Y FOSFITO EN PLÁNTULAS DE CAÑA DE AZÚCAR

Fernando Carlos Gómez-Merino; Libia Iris Trejo-Téllez; Víctor Hugo. Carbajal-Vázquez

Colegio de Posgraduados Campus Montecillo.
fernandg@colpos.mx

RESUMEN

A nivel global, el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbridos) es de alta importancia para la producción de azúcar, biomasa, bioetanol, y captura de CO_2. Como sistema productivo genera empleos directos e indirectos y constituye una base relevante para la producción de biocombustibles y energías renovables. Su alta demanda plantea desafíos de sostenibilidad, lo que hace necesarias tecnologías que permitan alta rentabilidad con menor impacto ambiental. La inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPC) ha ganado relevancia para mejorar la sostenibilidad y productividad agrícola. Entre ellas, *Azospirillum brasilense* es una rizobacteria benéfica que coloniza las raíces, promueve el crecimiento vegetal a través del desarrollo radicular, mejora la absorción de nutrimentos e induce tolerancia a factores de estrés abiótico. El fosfito (Phi) es un bioestimulante inorgánico con potencial de mejorar parámetros fisiológicos y bioquímicos en cultivos. En este estudio se evaluaron los efectos principales de la inoculación con *A. brasilense* y la aplicación foliar con Phi, así como de interacción, en plántulas caña de azúcar. Se estableció un experimento factorial 5 × 2 con distribución completamente al azar y cuatro repeticiones por tratamiento, siendo una planta por maceta la unidad experimental. Los niveles de Phi fueron: 0, 50, 100, 150 y 200 mM; los de *A. brasilense* fueron: sin y con inoculación. Las plántulas se obtuvieron por micropropagación *in vitro* del cv. Mex 69-290. Después de su aclimatación en invernadero y al alcanzar 10 cm de altura, se inocularon con *A. brasilense* a una concentración de 2×10^{12} unidades formadoras de colonias (UFC). Las plántulas inoculadas se mantuvieron durante 30 d en condiciones de invernadero a una temperatura de 35 °C, una humedad relativa de 30% y una irradiancia de 150 µmol m^{-2} s^{-1}. Se aplicó riego una vez al día con agua osmotizada. Posteriormente se trasplantaron a bolsas negras (45 × 45 cm) con tezontle previamente desinfectado y se cultivaron 72 días con solución nutritiva de Steiner al 50%. Las plantas se podaron a 15 cm. A los 77 días después del trasplante (ddt) se realizaron cuatro aspersiones foliares de Phi en las concentraciones antes descritas a intervalos de 15 d. A los 30 días después de aplicados los tratamientos (ddtrat) se midieron las unidades SPAD (SPAD) en hojas y el diámetro de tallo (DT). Con los resultados obtenidos se realizó un análisis PROC GLM y comparación de medias por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). En las dos variables evaluadas solo fueron significativos los efectos principales de los factores de estudio, y no existió efecto significativo de la interacción. El Phi a concentración 200 mM redujo significativamente las unidades SPAD en 18%, con respecto al tratamiento testigo. Asimismo, las plántulas tratadas con *A. brasilense* presentaron valores de SPAD 9% menores que las no inoculadas. En DT, la dosis 50 mM Phi mostró el mayor valor medio, superando a 100, 150 y 200 mM Phi en 16, 23 y 24%, respectivamente, aunque sin diferencia estadística respecto al testigo. En comparación con el testigo, la aplicación de 50 mM Phi incrementó el DT en 13%. La inoculación con *A. brasilense* redujo el DT en 12.5% respecto al tratamiento sin inoculación. Se concluye que, en las evaluaciones realizadas a los 30 ddtrat, la aplicación de Phi y la inoculación con *A. brasilense* no tuvo efectos benéficos en unidades SPAD y DT.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbridos) en México tiene más de cinco siglos de historia y constituye una de las actividades agroindustriales más importantes del país. Durante el ciclo azucarero 2024/25, la producción se desarrolló en 16 estados y 290 municipios, abasteciendo a 47 ingenios azucareros. Además de la elaboración de azúcar, de la caña se obtienen alcohol, piloncillo y miel. El principal producto derivado es la sacarosa; asimismo, se generan subproductos

como el bagazo (el cual es usado como generador de energía) y cachaza (funciona como abono y reestructurador de suelos). Actualmente, se cultivan más de 800 mil hectáreas destinadas a la agroindustria azucarera; de estas, 60% corresponden a temporal, 20% a riego de auxilio y 20% a riego normal. Los sistemas de cultivo incluyen planta, soca y resoca, cuya productividad depende en gran medida de las condiciones climáticas. La zafra 2012/13 representó el máximo histórico de producción, con casi siete millones de toneladas de azúcar y 780 mil hectáreas industrializadas. En contraste, la zafra 2024/25 registró poco más de 4.7 millones de toneladas debido a las sequías prolongadas entre 2020 y 2024, lo que se reflejó en reducciones de 26.2% en caña y 31.6% en la producción de azúcar respecto al récord histórico (DOF, 2026).

El uso de inoculantes microbianos representa una alternativa prometedora para incrementar la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad ambiental en el cultivo de caña de azúcar. Entre estos, destaca la inoculación con bacterias como *Azospirillum brasilense,* la cual forma parte de los principales géneros bacterianos que se han sido probados con éxito en diferentes cultivos y favorece el desarrollo radicular, el vigor de la planta, la absorción de nutrientes y la tolerancia al estrés abiótico. Sus efectos se atribuyen principalmente a la fijación biológica de nitrógeno y a la síntesis de fitohormonas (Inacio *et al*., 2026). Las etapas tempranas del cultivo caña de azúcar como la emergencia y crecimiento inicial, se consideran adecuadas para aplicar *Azospirillum brasilense*, ya que en estas fases se favorece el crecimiento vegetativo (da Silva *et al*., 2020; Scudeletti *et al*., 2023).

El fosfito (Phi), derivado del ácido fosforoso y análogo del fosfato (Pi), ha adquirido gran relevancia en la agricultura moderna debido a su función como bioestimulante y agente fitosanitario. Diversos estudios destacan que su aplicación favorece la asimilación de nutrimentos, estimula el crecimiento radicular y mejora el desarrollo y rendimiento de los cultivos. En caña de azúcar, el Phi ha mostrado efectos positivos durante las primeras etapas de crecimiento, incrementando indicadores de calidad como el contenido y la calidad del jugo, además de inducir tolerancia frente a distintos factores de estrés abiótico. También se ha observado un efecto estimulante en cultivos *in vitro* y en especies establecidas bajo condiciones ambientales adversas (Gómez-Merino y Trejo-Téllez, 2015). A diferencia de lo que ocurre con el fosfato, las plantas no poseen mecanismos naturales para metabolizar el Phi, por lo que no puede considerarse una fuente convencional de fósforo. Su eficacia depende de un adecuado suministro de Pi y de dosis correctamente ajustadas según las necesidades del cultivo. Factores como genotipo, ambiente, manejo agronómico y fuente utilizada de Phi influyen directamente en la respuesta vegetal (Gómez-Merino *et al*., 2022).

Por otro lado, aplicaciones excesivas de Phi o un suministro deficiente de Pi pueden alterar el equilibrio iónico y generar toxicidad severa, incluso provocando la muerte de las plantas. Estas alteraciones también afectan los mecanismos de percepción de deficiencia de fósforo. Debido a ello, el Phi ha demostrado potencial herbicida en algunas especies. Actualmente, mediante ingeniería genética, se han transferido genes bacterianos capaces de metabolizar Phi a plantas, abriendo posibilidades para sistemas sostenibles de fertilización y control de malezas basados en química verde (Trejo-Téllez *et al*., 2024).

TEORÍA

La micropropagación es una estrategia eficiente para producir material vegetal uniforme, con alto vigor y mayor capacidad de establecimiento en campo. El cultivo de tejidos vegetales *in vitro* es útil para estudiar procesos fisiológicos, bioquímicos y genéticos relacionados con la respuesta a la bioestimulación. Comprender estos mecanismos fisiológicos y bioquímicos puede contribuir a mejorar la calidad, el rendimiento y la resiliencia del cultivo de caña de azúcar (Spinoso-Castillo *et al*., 2024).

Los bioestimulantes como el Phi han adquirido relevancia por su capacidad para mejorar el vigor fisiológico, la absorción de nutrientes y la tolerancia al estrés abiótico. Este anión promueve el desarrollo radicular, el crecimiento vegetal y la resistencia al estrés en diversos cultivos, incluida la

caña de azúcar, además de favorecer cambios morfológicos y bioquímicos positivos durante las primeras etapas de desarrollo. También ha sido utilizado como controlador de malezas (Li *et al*., 2025), mientras que en la reproducción *in vitro*, estimula el crecimiento de tejidos y modifica la producción de metabolitos secundarios (Han *et al*., 2021).

PARTE EXPERIMENTAL

En la presente investigación se evaluaron dos factores de estudio: por un lado, la inoculación de las plántulas de caña de azúcar con *A. brasilense* y por otro, la aplicación foliar con Phi; así como la interacción entre ambos factores. Con base en lo anterior, se estableció un experimento factorial 5 × 2 completamente al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta por maceta. Los tratamientos con *A. brasilense* fueron: sin y con inoculación, en tanto que, para el Phi los niveles fueron: 0, 50, 100, 150 y 200 mM. El material vegetal se obtuvo a través de la micropropagación *in vitro* de caña de azúcar cv. Mex 69-290. Las plántulas obtenidas de la micropropagación se sembraron en bandejas de polipropileno con capacidad para 50 unidades (53.38 cm^3), previamente rellenadas con una mezcla de sustratos que incluyó compost, turba y agrolita en proporciones de 2:1:1 (v/v/v). Una vez que las plántulas alcanzaron una altura de 10 cm, se inocularon con *A. brasilense* a una concentración de 2×10^{12} unidades formadoras de colonias (UFC). Las plántulas inoculadas se mantuvieron durante 30 d en condiciones de invernadero a una temperatura de 35 °C, una humedad relativa de 30% y una irradiancia de 150 µmol m^{-2} s^{-1}. Se aplicó riego una vez al día con agua osmotizada. Posteriormente se trasplantaron a bolsas negras (45 × 45 cm) con tezontle previamente desinfectado y se cultivaron por 72 días con solución nutritiva de Steiner al 50%. Antes de las aplicaciones foliares con Phi, las plantas se podaron a 15 cm. A los 77 días después del trasplante (ddt) se realizaron cuatro aspersiones foliares de Phi en las concentraciones antes descritas, con intervalos de 15 d. A los 30 días después de los tratamientos (ddtrat) se midieron las unidades SPAD en hojas y el diámetro de tallo (DT). Con los resultados obtenidos, se realizó un análisis mediante PROC GLM y comparación de medias por la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS

La clorofila es el principal pigmento fotosintético. Las hojas absorben el 85% de la radiación solar visible para la actividad fotosintética, reflejando el 10% y emitiendo el 2% como fluorescencia. Este balance varía según el contenido del pigmento en cada fase de desarrollo de la planta, el cual depende directamente de factores ambientales que detonan respuestas estructurales, de desarrollo y crecimiento (Cavalcante *et al*., 2015). Durante la fotosíntesis, la fijación de carbono en esta planta C4 está altamente correlacionada con la acumulación de biomasa (Angel y MacCabe, 2022).

En el presente estudio, las dos variables evaluadas solo mostraron efectos significativos de los factores de estudio de forma individual, sin observarse efectos significativos por su interacción. El Phi a una concentración 200 mM redujo significativamente las unidades SPAD en 18%, con respecto al tratamiento testigo. En DT, la dosis 50 mM Phi mostró el mayor valor medio, superando a las dosis de 100, 150 y 200 mM Phi en 16, 23 y 24%, respectivamente, aunque sin diferencia respecto al testigo. En comparación directa con el testigo, 50 mM Phi incrementó el DT en 13% (**Figura 1**).

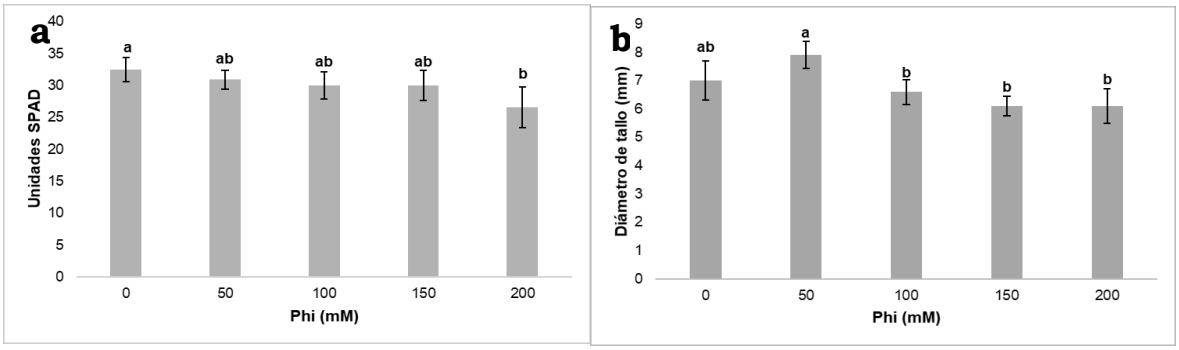


Figura 1. Efecto de fosfito en variables en unidades SPAD (a) y el diámetro de tallo (b), de plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido) cv. Mex 69-290. Medias ± DE con letras distintas en cada panel indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Asimismo, las plántulas tratadas con *A. brasilense* presentaron valores de SPAD 9% menores que las no inoculadas. Respecto al DT, la inoculación con *A. brasilense* redujo el promedio de esta variable en 12.5% respecto al tratamiento sin inoculación (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Efecto de la inoculación con *Azospirillum brasilense* en las unidades SPAD y diámetro de tallo de plántulas de caña de azúcar (*Saccharum* spp. Híbrido) cv. Mex 69-290.

A. brasilense	**Unidades SPAD**	**Diámetro de tallo (mm)**
Con inoculación	28.6 ± 3.5 b	6.3 ± 0.5 b
Sin inoculación	31.4 ± 1.9 a	7.2 ± 0.5 a

Medias ± DE con letras distintas en cada panel indican diferencias estadísticas (Tukey, $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Los resultados evidenciaron que los factores evaluados actuaron de manera independiente, ya que no se detectó interacción significativa entre las concentraciones de fosfito y la inoculación con *Azospirillum brasilense*. Las dosis elevadas de Phi, afectaron negativamente el contenido relativo de clorofila, reflejado en la disminución de las unidades SPAD, lo que sugiere posibles efectos de estrés fisiológico en las plántulas. La inoculación con *A. brasilense* redujo tanto los valores SPAD como el DT, indicando que, bajo las condiciones del estudio, la bacteria no promovió el crecimiento vegetal. En contraste, la aplicación de 50 mM Phi mostró un efecto favorable sobre el DT, al presentar los valores más altos y superar incluso al tratamiento testigo, lo que indica que bajas concentraciones de fosfito podrían estimular parcialmente el crecimiento de las plántulas. La respuesta de las plantas dependió principalmente de la dosis de Phi aplicada, siendo las concentraciones moderadas las más adecuadas para mantener un mejor desarrollo vegetal.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. R. Cavalcante, R. J. M. C. Nogueira, M. M. A.Silva, E. Bezerra-Neto, “Gaseous exchanges, growth and foliar anatomy of sugarcane plants grown in potassium (K) deprived nutrient solution”, Aust. J. Crop Sci., 9, 7, 2015, pp. 577-584.
2. DOF, “Diario Oficial de la Federación: Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2026-2030”. Consultado en línea el 25 de mayo de 2026: de https://sidof.segob.gob.mx/notas/57876896.
3. D. Scudeletti, C. A. C. Crusciol, L. Momesso, J. W. Bossolani, L. G. Moretti, E. F. De Oliveira, B. D. Tubaña, M. D. A. Silva, S. G. Q. de Castro, M. Hungria, “Inoculation with *Azospirillum*

brasilense as a strategy to enhance sugarcane biomass production and bioenergy potential", Eur. J. Agron., Vol. 144, 2023, 126749.
4. F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, "Biostimulant activity of phosphite in horticulture", Sci. Hortic., 196, 2015, pp. 82-90.
5. F. C. Gómez-Merino, L. F. Gómez-Trejo, R. Ruvalcaba-Ramírez, L. I. Trejo-Téllez, "Application of phosphite as a biostimulant in agriculture", In: *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2022, pp. 135-153.
6. J. L. Spinoso-Castillo, E. Mancilla-Álvarez, J. J. Bello-Bello, "*In vitro* response of sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrid) plantlets to flooding stress", J. Biotechnol., Vol. 393, 2024, pp. 74-80.
7. K. A. M. Inacio, M. C. Abreu, T. C. C. de Oliveira, C. C. Santos, F. E. Wagner, M. Mauad, "*Azospirillum brasilense*, urease inhibitor, and sulfur contributes on initial growth of wheat", Braz. J. Biol., 85, 2025, e289479.
8. L. I. Trejo-Téllez, V. H. Carbajal-Vázquez, J. Lavín-Castañeda, F. C. Gómez-Merino, Phosphite as a sustainable and versatile alternative for biostimulation, biocontrol, and weed management in modern agriculture. Processes, Vol. 12, 12, 2024, 2764.
9. V. R. da Silva, M. B. R. de Almeida, L. A. M. Lisboa, R. S. Junior, T. A. R. Nogueira, P. A. M. de Figueiredo, M. C. M. Filho, S. B. Ramos, "Morphological changes in sugarcane crop induced by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*". Sugar Tech, Vol. 22, 2, 2020, pp. 241-249.
10. X. Han, Y. Xi, Z. Zhang, M.A. Mohammadi, J. Joshi, T. Borza, G. Wang-Pruski, "Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in Solanum tuberosum. Ecotoxicol. Environ. Saf., 210, 2021, 111873
11. Y. Angel, M. F. McCabe, "Machine learning strategies for the retrieval of leaf-chlorophyll dynamics: model choice, sequential versus retraining learning, and hyperspectral predictors", Front. Plant Sci., Vol. 13, 2022, 722442.
12. Z. Li, X. Kong, Z. Zhang, F. Tang, M. Wang, Y. Zhao, F. Shi, "The functional mechanisms of phosphite and its applications in crop plants. Front. Plant Sci., Vol. 16, 2025, 153859.

SIMULACIÓN DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL IN SILICO Y PREDICCIÓN DEL POTENCIAL BIOACTIVO DE PÉPTIDOS DE AMARANTO (*A. Cruentus Y A. Hypochondriacus)*

Orlando Arellano Castillo[1], Marlenne Y. Lima Silva[2], Gloricel Serena Romero[1], Anaís Ignot Gutiérrez[3], Armando J. Martínez Chacón[3] y Elvia Cruz Huerta[2]

[1]Centro de Investigaciones Biomédicas, Universidad Veracruzana, [2]Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, [3]Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana.
orlandoarca94@gmail.com

RESUMEN

El amaranto es un pseudocereal que ha sido pilar cultural y nutricional en México, considerado un grano sagrado desde la época prehispánica por su importancia en rituales y su papel en el sustento de las civilizaciones antiguas. Actualmente, en México se cultivan principalmente las especies *Amaranthus hypochondriacus* y *Amaranthus cruentus*. El grano de amaranto contiene proteínas de alto valor biológico con un perfil de aminoácidos completo; particularmente es rico en lisina, aminoácidos azufrados (metionina y cisteína). Su fracción proteica se compone principalmente de glutelinas, albúminas, globulinas y prolaminas, presenta alta digestibilidad y exhibe propiedades tecnológicas y funcionales relevantes. El objetivo de este estudio fue simular la digestión gastrointestinal in silico y predecir el potencial bioactivo de péptidos de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*. Las secuencias proteicas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* se obtuvieron de la base de datos UniProt. La digestión se simuló empleando el software Rapid Peptides Generator (RPG), configurado para realizar una hidrólisis secuencial con las enzimas pepsina para la fase gástrica y con tripsina y quimotripsina para la fase intestinal. El flujo de trabajo se implementó en Python a través de la interfaz de Google Colab. La probabilidad de bioactividad de los péptidos resultantes se predijo mediante el software PeptideRanker y las actividades específicas se determinaron con el software MultiPep. La digestión in silico de las proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* generó un total de 7039 y 7990 péptidos, respectivamente. Como fase inicial de cribado, se empleó el software PeptideRanker para seleccionar los péptidos con una puntuación ≥ 0.8 como candidatos con mayor potencial bioactivo. Esto dio como resultado 379 péptidos de *A. cruentus* y 395 de *A. hypochondriacus*. El software MultiPep identificó 270 péptidos de *A. cruentus* con una puntuación ≥ 0.8 en al menos una categoría, incluidos 134 péptidos multifuncionales. En el caso de *A. hypochondriacus*, se identificaron 292 péptidos bioactivos, de los cuales 155 se clasificaron como multifuncionales. Los péptidos bioactivos predichos de *A. hypochondriacus* presentaron longitudes de 2 a 19 residuos de aminoácidos, mientras que los de *A. cruentus* mostraron longitudes de 2 a 29 residuos. En ambas especies, las principales categorías predichas estuvieron relacionadas con actividad antihipertensiva, inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), inhibición de dipeptidil peptidasa-IV (DPP-IV), actividad antidiabética y actividad antioxidante. Estos resultados sugieren que *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* son una fuente prometedora de péptidos multifuncionales con potencial nutracéutico; no obstante, se requiere validación experimental mediante ensayos in vitro e in vivo para confirmar su bioactividad y seguridad en relación con enfermedades crónicas no transmisibles como la hipertensión y la diabetes, así como su posible contribución frente al estrés oxidativo.

INTRODUCCIÓN

El diseño de alimentos funcionales y la identificación de nuevas moléculas con potencial bioactivo se han convertido en áreas prioritarias dentro de la ciencia de los alimentos y la nutrición. Entre las matrices alimentarias de interés, los pseudocereales destacan por su composición nutricional, su contenido proteico y su potencial como fuentes de compuestos con actividad biológica. En este contexto, el amaranto destaca por su arraigo histórico y cultural en México desde la época prehispánica y también por su perfil nutricional favorable en comparación con los cereales

convencionales, caracterizado por proteínas de alta digestibilidad y un adecuado balance de aminoácidos esenciales.

A pesar de que el grano de amaranto ha sido ampliamente estudiado por sus propiedades nutricionales, tecnológicas y funcionales, aún existe información limitada sobre el potencial comparativo de las proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* como fuentes de péptidos bioactivos. Estos fragmentos proteicos pueden ejercer actividades biológicas relevantes, incluidas actividades antioxidante, antihipertensiva y antidiabética. Sin embargo, la identificación experimental de péptidos bioactivos mediante aislamiento, purificación y validación en laboratorio representa un proceso complejo, costoso y prolongado.

Ante esta limitación, las herramientas bioinformáticas han adquirido relevancia en la ciencia de los alimentos, ya que permiten simular la hidrólisis enzimática, predecir la bioactividad de secuencias peptídicas y priorizar candidatos con mayor potencial funcional. Las aproximaciones *in silico* actúan como una estrategia preliminar de cribado, al reducir el número de secuencias que requieren validación experimental posterior mediante ensayos *in vitro* e *in vivo*.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue simular la digestión gastrointestinal *in silico* de proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*, para evaluar y comparar el potencial bioactivo de los péptidos resultantes. Mediante este enfoque bioinformático, se buscó identificar de manera preliminar secuencias peptídicas con propiedades multifuncionales y potencial interés para el desarrollo de alimentos funcionales o ingredientes nutracéuticos.

TEORÍA

El amaranto es un pseudocereal arraigado en la historia de México, donde ha sido reconocido como un pilar cultural y nutricional desde la época prehispánica. Su valor trascendió el uso alimentario cotidiano ya que fue considerado un grano sagrado en diversos rituales religiosos de las civilizaciones antiguas (Velasco et al., 2016). En la actualidad, este cultivo mantiene relevancia agrícola, nutricional y científica, destacando principalmente las especies *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* (Reyes-Rosales et al., 2023).

Desde una perspectiva nutricional, el grano de amaranto sobresale frente a los cereales convencionales debido a su contenido de proteínas de alto valor biológico y a su perfil equilibrado de aminoácidos esenciales. En particular, destaca por su aporte de lisina y aminoácidos azufrados, como metionina y cisteína. Su fracción proteica está constituida principalmente por glutelinas, albúminas, globulinas y prolaminas, las cuales se han asociado con alta digestibilidad y con propiedades tecnológicas y funcionales de interés para la ciencia de los alimentos (Toimbayeva et al., 2025).

A partir de estas proteínas es posible obtener péptidos bioactivos, definidos como fragmentos específicos de proteínas que pueden ejercer efectos fisiológicos favorables dependiendo de su secuencia, longitud, composición de aminoácidos, estructura, hidrofobicidad y carga neta (Sánchez & Vázquez, 2017). Estos péptidos pueden liberarse durante procesos como la digestión gastrointestinal, la fermentación o la hidrólisis enzimática controlada.

El estudio de péptidos bioactivos derivados de proteínas vegetales ha generado un gran interés debido a su potencial multifuncional. Entre las actividades biológicas más estudiadas se encuentran la antioxidante, antihipertensiva, antidiabética, antiinflamatoria y cardioprotectora. Por ello, estos compuestos se consideran candidatos de interés para el desarrollo de alimentos funcionales, ingredientes nutracéuticos y estrategias complementarias orientadas a la salud metabólica (Usman et al., 2022).

No obstante, la identificación, aislamiento, purificación y validación experimental de secuencias peptídicas bioactivas puede ser un proceso costoso, prolongado y técnicamente demandante. En este contexto, las aproximaciones in silico ofrecen una alternativa útil para predecir productos

derivados de la hidrólisis enzimática, estimar la probabilidad de bioactividad de las secuencias generadas y priorizar candidatos antes de su evaluación experimental. De esta manera, estas herramientas permiten reducir el espacio de búsqueda y optimizar los recursos destinados a la validación *in vitro* e *in vivo* (Vincenzi et al., 2024).

Por lo tanto, la integración de herramientas bioinformáticas para el estudio de proteínas y péptidos derivados de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* representa una estrategia viable para la identificación preliminar de secuencias peptídicas con potencial bioactivo.

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención de secuencias proteicas

Las secuencias de aminoácidos correspondientes a proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* se obtuvieron de la base de datos UniProt (Ahmad et al., 2025) y fueron recopiladas en formato FASTA. La búsqueda se realizó utilizando como criterios los términos taxonómicos "*Amaranthus cruentus*" y "*Amaranthus hypochondriacus*", restringidos al organismo correspondiente. Para cada especie se recuperaron las secuencias proteicas disponibles en UniProt y se registraron los identificadores de acceso, nombre de la proteína, organismo de origen, longitud de la secuencia y estado de curación de la entrada.

Simulación de la digestión gastrointestinal in silico

La digestión gastrointestinal in silico se simuló utilizando Rapid Peptides Generation (RPG) (Maillet, 2020), integrado en un flujo de trabajo ejecutado en Python dentro del entorno de Google Colab. La simulación se llevó a cabo mediante una hidrólisis enzimática secuencial con pepsina, tripsina y quimotripsina. Primero, las proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* fueron sometidas a una fase gástrica simulada con pepsina. Posteriormente, los péptidos obtenidos en esta etapa se emplearon como sustrato para la fase intestinal, simulada mediante hidrólisis consecutiva con tripsina y quimotripsina. Una vez finalizada la digestión, se depuró la base de datos peptídica mediante la eliminación de secuencias duplicadas, con el fin de conservar solo los péptidos únicos. Los péptidos resultantes se organizaron de acuerdo con la especie de origen, fase digestiva, proteína precursora, longitud, masa molecular y secuencia de aminoácidos, para su posterior análisis de bioactividad.

Cribado inicial de potencial bioactivo

Los péptidos generados mediante digestión gastrointestinal in silico fueron sometidos a un cribado inicial con PeptideRanker (Mooney et al., 2012), herramienta que evalúa propiedades estructurales y fisicoquímicas de las secuencias peptídicas para asignar una puntuación general de probabilidad bioactiva en un rango de 0 a 1. Para este estudio, se seleccionaron únicamente los péptidos con puntuaciones ≥ 0.8, con el fin de priorizar aquellos con mayor probabilidad de presentar actividad biológica. Este criterio permitió reducir el conjunto inicial de péptidos generados. De los 7039 péptidos obtenidos para *A. cruentus*, 379 superaron el umbral establecido, mientras que, de los 7990 péptidos generados para *A. hypochondriacus*, 395 presentaron puntuaciones ≥ 0.8. Las secuencias seleccionadas fueron consideradas candidatos prioritarios y se emplearon en la siguiente etapa para la predicción de bioactividades específicas mediante herramientas bioinformáticas complementarias.

Predicción de actividades biológicas especificas

Los péptidos seleccionados mediante PeptideRanker fueron analizados mediante el software MultiPep (Grønning et al., 2021) para predecir sus posibles actividades biológicas específicas. MultiPep es una herramienta basada en modelos de aprendizaje profundo que permite clasificar secuencias peptídicas en múltiples categorías funcionales. En este estudio, se consideraron como potencialmente bioactivos aquellos péptidos que alcanzaron una puntuación ≥ 0.8 en al menos una categoría predicha. Asimismo, se clasificaron como péptidos multifuncionales aquellas secuencias que presentaron puntuaciones ≥ 0.8 en dos o más categorías bioactivas. Las bioactividades evaluadas incluyeron principalmente inhibición de la enzima convertidora de angiotensina, inhibición de DPP-IV, actividad antioxidante, actividad antidiabética, actividad antihipertensiva y otras

funciones de interés metabólico. Los resultados se organizaron por especie, fase digestiva, secuencia, puntuación de predicción y número de bioactividades asociadas.

Predicción de toxicidad

El potencial tóxico de los péptidos seleccionados después del cribado bioactivo se evaluó mediante la plataforma ToxinPred2 (Gupta et al., 2013), con el propósito de identificar secuencias que pudieran estar asociadas con posibles efectos tóxicos. Las secuencias peptídicas fueron clasificadas como potencialmente tóxicas o no tóxicas de acuerdo con los criterios de predicción establecidos por la herramienta. Aquellas secuencias clasificadas como potencialmente tóxicas fueron registradas de manera independiente y excluidas del conjunto de candidatos prioritarios para estudios posteriores.

Identificación de péptidos bioactivos previamente descritos

Los péptidos seleccionados después del cribado con PeptideRanker, MultiPep y la evaluación de toxicidad fueron comparados con la base de datos BIOPEP-UWM (Minkiewicz et al., 2019), con la finalidad de identificar coincidencias con secuencias peptídicas bioactivas previamente descritas. Para ello, las secuencias generadas mediante digestión gastrointestinal in silico se contrastaron con los péptidos registrados en BIOPEP-UWM. En cada coincidencia se registró la secuencia, la actividad biológica asociada, la fuente de información y la categoría funcional correspondiente. Este análisis permitió diferenciar las bioactividades predichas computacionalmente de aquellas que ya cuentan con antecedentes en literatura científica o en repositorios especializados.

RESULTADOS

La digestión in silico de las proteínas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* generó un total de 7039 y 7990 péptidos, respectivamente. El cribado inicial con PeptideRanker, utilizando como criterio una puntuación ≥ 0.8, permitió seleccionar los péptidos con mayor probabilidad de bioactividad. Como resultado, se obtuvieron 379 péptidos candidatos de *A. cruentus* y 395 de *A. hypochondriacus*.
El análisis con MultiPep permitió identificar 270 péptidos de *A. cruentus* con puntuación ≥ 0.8 en al menos una categoría bioactiva predicha; de estos, 134 presentaron puntuaciones ≥ 0.8 en dos o más categorías y fueron clasificados como multifuncionales. En *A. hypochondriacus*, se identificaron 292 péptidos con puntuación ≥ 0.8 en al menos una categoría bioactiva, de los cuales 155 cumplieron el criterio de multifuncionalidad. Las categorías predominantes estuvieron asociadas con actividad antihipertensiva, inhibición de la enzima convertidora de angiotensina, inhibición de DPP-IV, actividad antidiabética y actividad antioxidante. Estos resultados son consistentes con lo reportado para los pseudocereales, cuyas proteínas pueden liberar péptidos con potencial bioactivo durante la digestión gastrointestinal (Morales et al., 2021).

Los péptidos bioactivos predichos de *A. hypochondriacus* presentaron una longitud de 2 a 19 residuos de aminoácidos, mientras que los de *A. cruentus* mostraron una longitud de 2 a 29 residuos (Figura 1A y 1C, respectivamente). En cuanto al peso molecular, en ambas especies predominó un intervalo de 0.4 a 0.6 kDa (Figura 1B y 1D). Estas características son relevantes, ya que la bioactividad de los péptidos se ha relacionado con parámetros estructurales como la longitud de la secuencia, el bajo peso molecular, la composición de aminoácidos, los motivos específicos de secuencia, la hidrofobicidad y la carga neta, los cuales pueden influir en su interacción con enzimas, receptores y membranas celulares (Pranita, 2026).

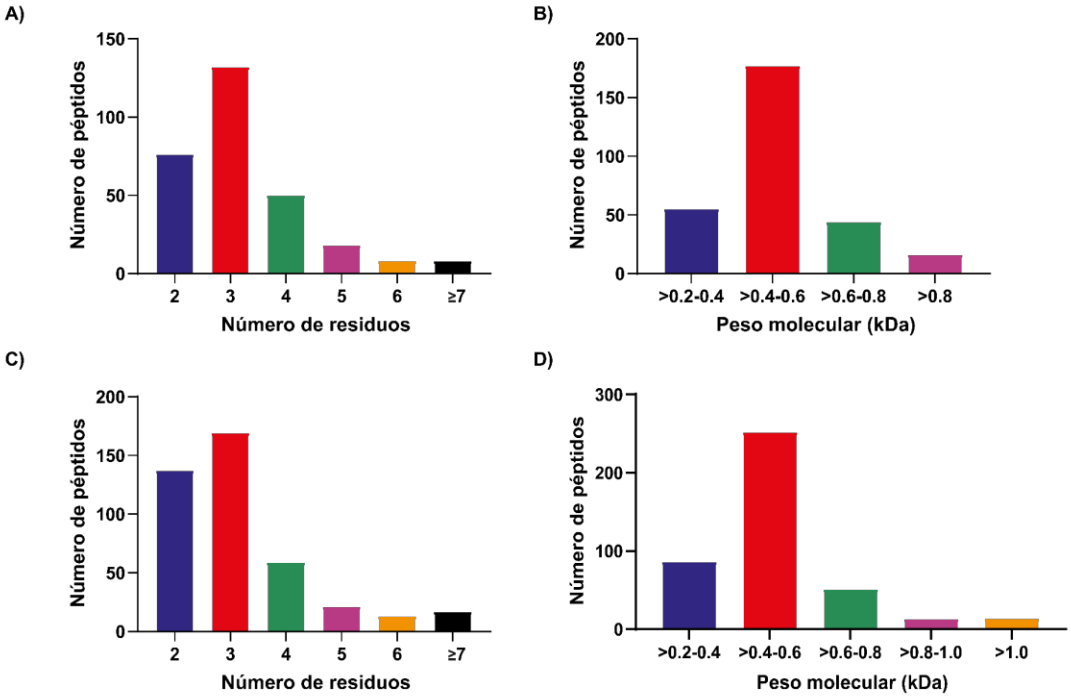


Fig. 1 Características estructurales de los péptidos bioactivos predichos derivados de proteínas de *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* mediante digestión gastrointestinal in silico y seleccionados con base en una puntuación ≥ 0.8 en PeptideRanker y ≥ 0.8 en al menos una categoría bioactiva predicha por MultiPep. A) Distribución del número de residuos de los péptidos bioactivos predichos de *A. hypochondriacus.* B) Distribución del peso molecular de los péptidos bioactivos predichos de *A. hypochondriacus.* C) Distribución del número de residuos de los péptidos bioactivos predichos de *A. cruentus.* D) Distribución del peso molecular de los péptidos bioactivos predichos de *A. cruentus*.

Las secuencias peptídicas identificadas mostraron potencial como antihipertensivos, inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) y la dipeptidil peptidasa-IV (DPP-IV), antidiabéticos y antioxidantes. Los péptidos con potencial antihipertensivo identificados en este estudio se relacionaron principalmente con la inhibición de la ECA. Esta actividad se ha vinculado con péptidos de bajo peso molecular, generalmente entre 1 y 3 kDa y con la presencia de residuos hidrofóbicos, aromáticos o cargados positivamente en el extremo C-terminal, características que pueden favorecer la afinidad por el sitio catalítico de la enzima (Ordóñez et al., 2026). En este contexto, secuencias como AFL, DFG, FVP, IF, LMP, GM, WT, WW y WNPR fueron asociadas con inhibición de la ECA, lo que sugiere su posible relevancia como candidatos antihipertensivos. Sin embargo, se requiere validar su actividad mediante ensayos de inhibición de ECA, determinación de IC_{50} y estudios complementarios de acoplamiento molecular.

Por otro lado, la inhibición de DPP-IV representa una estrategia relevante para la modulación del metabolismo glucémico, debido a que esta enzima participa en la degradación de incretinas como GLP-1. Los péptidos inhibidores de DPP-IV suelen ser secuencias cortas, generalmente de 2 a 7 residuos de aminoácidos, y con frecuencia presentan prolina o alanina como penúltimo residuo en el extremo N-terminal, característica que puede favorecer su interacción con la enzima (Wang et al., 2024). En este estudio se identificaron péptidos cortos asociados con potencial inhibidor de DPP-IV, entre ellos AF, AW, FN, IW, KW, WRL, WRN, WRW y YW. La presencia de residuos hidrofóbicos y aromáticos en estas secuencias podría contribuir a su interacción con sitios funcionales de DPP-IV. Sin embargo, esta actividad inhibitoria debe validarse mediante ensayos enzimáticos específicos, ya que la predicción computacional no permite determinar la potencia inhibitoria, la selectividad, el mecanismo de inhibición ni la estabilidad de los péptidos frente a enzimas intestinales.

La actividad antioxidante de los péptidos se ha relacionado con la presencia de aminoácidos capaces de donar protones o electrones, estabilizar radicales libres, quelar metales prooxidantes o interrumpir reacciones de oxidación en cadena (Zou et al., 2016). En proteínas de amaranto, residuos como triptófano, tirosina, histidina, fenilalanina, metionina y cisteína se han asociado con este potencial antioxidante, debido a sus grupos funcionales y a su capacidad para participar en mecanismos de transferencia de hidrógeno o electrones (Orsini Delgado et al., 2016; Sun et al., 2019; Serena-Romero et al., 2023). Además, la posición de ciertos residuos dentro de la secuencia peptídica puede influir en su bioactividad; por ejemplo, la presencia de histidina en la región N-terminal podría favorecer la interacción con radicales peroxilo y contribuir a la neutralización de especies reactivas (Siow & Gan, 2016). En este estudio, secuencias como AW, FD, GC, IRW, LAF, LW, MM, MY, PHW, RW, TW, VW, WG, WL, WY y YF fueron asociadas con actividad antioxidante predicha o previamente descrita. Estos resultados sugieren que los péptidos derivados de proteínas de amaranto podrían tener potencial para modular procesos oxidativos. No obstante, la actividad antioxidante de las secuencias no descritas previamente, así como de aquellas identificadas únicamente mediante predicción computacional, debe confirmarse mediante ensayos antioxidantes químicos y modelos celulares que permitan evaluar su eficacia.

Tras la evaluación de las secuencias obtenidas, solo SVEGSEMGVAAEDDGCPCGPNCKCDPCTCK fue identificado como posible péptido tóxico.

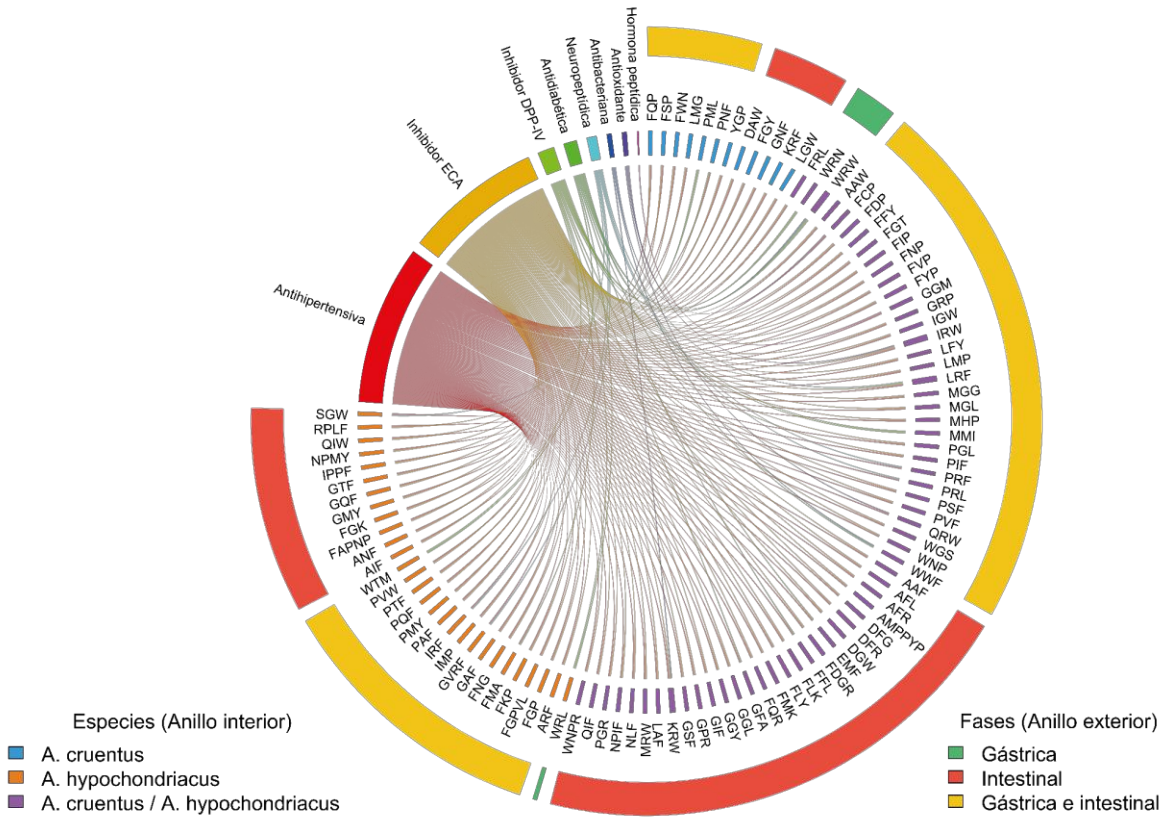


Fig. 2 Relación entre péptidos multifuncionales derivados de proteínas de amaranto y sus bioactividades predichas mediante MultiPep. El diagrama de cuerdas muestra los péptidos con longitud ≥ 3 residuos de aminoácidos y con al menos dos bioactividades predichas con puntuación ≥ 0.8. El anillo interno representa la especie de origen del péptido, mientras que el anillo externo representa la fase digestiva en la que fue generado. Las conexiones indican la asociación entre cada secuencia peptídica y las bioactividades predichas.

El diagrama de cuerdas muestra 102 péptidos con al menos dos bioactividades predichas y puntuaciones ≥ 0.8 en PeptideRanker (PR) y MultiPep (MP). Dentro de este grupo, se observó una mayor proporción de péptidos compartidos entre *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* (Tabla 1).

La identificación de secuencias comunes entre ambas especies sugiere la presencia de regiones proteicas conservadas capaces de liberar motivos bioactivos similares durante la digestión gastrointestinal simulada. Esta coincidencia podría explicarse por la similitud evolutiva y composicional entre ambas especies de amaranto, así como por la presencia de proteínas de reserva con dominios parcialmente conservados. Sin embargo, la abundancia real de estos péptidos después de la digestión dependerá de la expresión relativa de las proteínas precursoras, la estructura de la matriz alimentaria, la accesibilidad de los sitios de corte enzimático y la estabilidad de los péptidos liberados.

Tabla 1. Bioactividades predichas y previamente descritas para péptidos derivados de proteínas de amaranto identificados mediante análisis in silico.

Secuencia	Bioactividad
AF	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de TPP-II, inhibidor de la ECA
AFL	Inhibidor de la ECA
ARF	Activador ACE2
AW	Inhibidor de DPP-IV, antioxidante, Inhibidor de la ECA
CF	Inhibidor de la ECA
DF	Inhibidor GCP-II, Inhibidor de la ECA
DFG	Inhibidor de la ECA
FA	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de alanina carboxipeptidasa, Inhibidor de DPP-III
FCF	Inhibidor de la ECA
FD	Antioxidante
FF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de pseudolisina, Inhibidor de la ECA
FFL	Inhibidor de la ECA
FG	Inhibidor de neprilisina, Inhibidor de la ECA
FGK	Inhibidor de la ECA
FH	Hipouricémico
FK	Hipouricémico, Inhibidor de la ECA
FL	Neuropéptido, Inhibidor de pseudolisina, Inhibidor de DPP-III, Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
FM	Inhibidor de DPP-III
FN	Inhibidor de DPP-IV
FQ	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
FQP	Inhibidor de la ECA
FR	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III, hipouricémico, Inhibidor de la ECA
FRF	Neuropéptido, antiviral
FT	Inhibidor de renina
FVP	Inhibidor de la ECA
FW	Inhibidor de neprilisina, hipouricémico, Inhibidor de la ECA
FWN	Inhibidor de la ECA
FY	Inhibidor de α-glucosidasa, hipotensor, inhibidor α-amilasa, antioxidante, Inhibidor de la ECA

GC	Antioxidante
GF	Inhibidor de DPP-III, inhibidor AAP, inhibidor de TPP-II, Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
GG	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de neprilisina, Inhibidor de la ECA
GGY	Inhibidor de la ECA
GL	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
GM	Inhibidor de la ECA
GP	Inhibidor de neprilisina, antiamnésico, hipotensor, antitrombótico, Inhibidor de DPP-IV, antioxidante, Inhibidor de la ECA
GPR	Inhibidor de DPP-IV, antitrombótico, Inhibidor de la ECA
GRP	Inhibidor de la ECA
HF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III
HW	Inhibidor de DPP-IV
IF	Inhibidor de la ECA
IRW	Estimulante, antidiabético, antiapoptótico, hipotensor, antiinflamatorio, antioxidante, Inhibidor de la ECA
IW	Inhibidor de DPP-IV, hipotensor, Inhibidor de la ECA
KF	Inhibidor de renina, Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
KW	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
LAF	Antioxidante
LF	Inhibidor de pseudolisina, Inhibidor de la ECA
LGW	Hipouricémico
LM	Inhibidor de DPP-IV
LMP	Inhibidor de la ECA
LW	Inhibidor de DPP-III, Inhibidor de DPP-IV, hipouricémico, Inhibidor de renina, antioxidante, Inhibidor de la ECA
MF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
MG	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
ML	Inhibidor de DPP-IV
MM	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de TPP-II, antioxidante, Inhibidor de la ECA
MP	Inhibidor de DPP-IV
MR	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III
MRW	Inhibidor de la ECA
MY	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor TPP- II, antioxidante, Inhibidor de la ECA
NF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
NW	Inhibidor de DPP-IV
PF	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de ACE2, Inhibidor de DPP-III
PGL	Inhibidor de la ECA
PGR	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
PHW	Antioxidante
QF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de renina
QGF	Inhibidor de HMG-Coa reductasa
QW	Inhibidor de DPP-IV
RF	Inhibidor leuciltransferasa, Inhibidor de DPP-III, Inhibidor de la ECA
RM	Inhibidor de DPP-IV

RP	Neuropéptido, inhibidor neurolisina, Inhibidor de la ECA, Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de neprilisina
RW	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III, antioxidante, Inhibidor de la ECA
SF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de renina, Inhibidor de la ECA
SW	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de lipasa pancreática
TF	Inhibidor de renina, Inhibidor de DPP-III, hipotenso, Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de lipasa pancreática, Inhibidor de la ECA
TW	Inhibidor de DPP-IV, antioxidante
VF	Inhibidor calpaína 1, inhibidor de TPP-II, Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de neprilisina 2, Inhibidor de la ECA
VW	Inhibidor xantina oxidasa, inhibidor de α-glucosidasa, hipouricémico, Inhibidor de DPP-IV, antioxidante, Inhibidor de la ECA
WD	Inhibidor de DPP-IV, antagonista PPARγ
WF	Inhibidor de DPP-IV
WG	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de renina, antioxidante, Inhibidor de la ECA
WH	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de α-glucosidasa, antiarteroesclerótico
WI	Inhibidor de DPP-IV
WK	Inhibidor de DPP-IV
WL	Neuropéptido, inmunomodulador, antagonista PPARγ, Inhibidor de DPP-IV, antioxidante, Inhibidor de la ECA
WM	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III, Inhibidor de la ECA
WN	Inhibidor de DPP-IV, antagonista PPARγ
WNPR	Inhibidor de la ECA
WQ	Inhibidor de DPP-IV, antagonista PPARγ
WR	Inhibidor de DPP-IV, antagonista PPARγ
WRL	Inhibidor de DPP-IV
WRN	Inhibidor de DPP-IV
WRW	Inhibidor de DPP-IV
WS	Inhibidor de DPP-IV, inhibidor de α-glucosidasa
WT	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
WW	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de la ECA
WY	Inhibidor de DPP-IV, antioxidante, Inhibidor de la ECA
YF	Inhibidor de DPP-IV, Inhibidor de DPP-III, antioxidante
YM	Inhibidor de DPP-IV
YW	Inhibidor de DPP-IV, antiinflamatorio, Inhibidor de la ECA

ECA: enzima convertidora de angiotensina; DPP-IV: dipeptidil peptidasa-IV; TPP-II: tripeptidil peptidasa II; GCP-II: glutamato carboxipeptidasa II.

La comparación con la literatura y con bases de datos especializadas permitió identificar que varias de las secuencias peptídicas obtenidas presentan bioactividades previamente descritas. Entre ellas, destacaron péptidos asociados con inhibición de la ECA, como AFL, DFG y LMP, así como secuencias multifuncionales como IRW, previamente relacionada con actividades hipotensora, antiinflamatoria y antioxidante. Asimismo, se identificaron péptidos vinculados con la inhibición de DPP-IV, como WRL, WRN, WRW, GPR y PGR, y con la inhibición de HMG-CoA reductasa, como QGF. También se observaron secuencias asociadas con actividad hipouricémica, como LGW; actividad antioxidante, como LAF y PHW y actividad antiviral, como FRF.

CONCLUSIONES

Estos resultados sugieren que *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* son una fuente prometedora de péptidos multifuncionales con potencial nutracéutico, con posibles efectos en la prevención y tratamiento de la hipertensión y la diabetes, así como para contrarrestar el estrés oxidativo.

La generación in silico de péptidos permitió detectar secuencias con alta puntuación de bioactividad global y múltiple, lo que permitirá priorizar candidatos con mayor probabilidad de efecto, reduciendo el espacio de búsqueda para validaciones experimentales in vitro/in vivo.

Como paso siguiente, la validación experimental es esencial para confirmar el potencia bioactivo de los péptidos derivados del amaranto, En este sentido, el análisis in silico representa una herramienta preliminar útil, rápida y de bajo costo para orientar la selección de péptidos derivados de proteínas de amaranto con posible aplicación en el desarrollo de alimentos funcionales o ingredientes nutracéuticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Velasco L., Ana Ma., Samuel L. Villela F., (2016), “El Amaranto”, Arqueología Mexicana núm. 138, pp. 21.
2. Ahmad, S., Jose Da Costa Gonzales, L., Bowler-Barnett, E. H., Rice, D. L., Kim, M., Wijerathne, S., Luciani, A., Kandasaamy, S., Luo, J., Watkins, X., Turner, E., Martin, M. J., Bateman, A., Martin, M. J., Orchard, S., Magrane, M., Ye, S., Adesina, A., Ahmad, S., … Zhang, J. (2025). The UniProt website API: facilitating programmatic access to protein knowledge. Nucleic Acids Research, 53(W1), W547–W553. https://doi.org/10.1093/NAR/GKAF394
3. Grønning, A. G. B., Kacprowski, T., & Schéele, C. (2021). MultiPep: a hierarchical deep learning approach for multi-label classification of peptide bioactivities. Biology Methods and Protocols, 6(1). https://doi.org/10.1093/BIOMETHODS/BPAB021
4. Gupta, S., Kapoor, P., Chaudhary, K., Gautam, A., Kumar, R., & Raghava, G. P. S. (2013). In Silico Approach for Predicting Toxicity of Peptides and Proteins. PLOS ONE, 8(9), e73957. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0073957
5. Maillet, N. (2020). Rapid Peptides Generator: fast and efficient in silico protein digestion. NAR Genomics and Bioinformatics, 2(1). https://doi.org/10.1093/NARGAB/LQZ004
6. Minkiewicz, P., Iwaniak, A., & Darewicz, M. (2019). BIOPEP-UWM Database of Bioactive Peptides: Current Opportunities. International Journal of Molecular Sciences 2019, Vol. 20, Page 5978, 20(23), 5978. https://doi.org/10.3390/IJMS20235978
7. Mooney, C., Haslam, N. J., Pollastri, G., & Shields, D. C. (2012). Towards the Improved Discovery and Design of Functional Peptides: Common Features of Diverse Classes Permit Generalized Prediction of Bioactivity. PLOS ONE, 7(10), e45012. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0045012
8. Morales, D., Miguel, M., & Garcés-Rimón, M. (2021). Pseudocereals: a novel source of biologically active peptides. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(9), 1537–1544. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1761774
9. Ordóñez, L. C., Pineda, N. M. G., Lizcano, B. I. E., Díaz, A. C. L., Ríos, L. J. C., Martínez, C. J., & Ruiz, J. C. R. (2026). Food-Derived Antihypertensive Peptides: Mechanisms, Multi-Methodological Approaches, Bioavailability, and Functional Food Applications. Molecules, 31(10), 1648. https://doi.org/10.3390/MOLECULES31101648
10. Orsini Delgado, M. C., Nardo, A., Pavlovic, M., Rogniaux, H., Añón, M. C., & Tironi, V. A. (2016). Identification and characterization of antioxidant peptides obtained by gastrointestinal digestion of amaranth proteins. Food Chemistry, 197, 1160–1167. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.11.092
11. Pranita, M. (2026). Bioactive Peptides from Natural Sources: Biochemical Mechanisms and Applications in Health and Food Review. Journal of Applied Biosciences and Agri-Food Technology, 1(1), 30–41. https://journal.unesa.ac.id/index.php/jabat/article/view/50133
12. Reyes-Rosales, A., Cabrales-Orona, G., Martínez-Gallardo, N. A., Sánchez-Segura, L., Padilla-Escamilla, J. P., Palmeros-Suárez, P. A., & Délano-Frier, J. P. (2023). Identification of genetic

and biochemical mechanisms associated with heat shock and heat stress adaptation in grain amaranths. Frontiers in Plant Science, 14. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101375

13. Sánchez, A., & Vázquez, A. (2017). Bioactive peptides: A review. Food Quality and Safety, 1(1), 29–46. https://doi.org/10.1093/FQSAFE/FYX006
14. Serena-Romero, G., Ignot-Gutiérrez, A., Conde-Rivas, O., Lima-Silva, M. Y., Martínez, A. J., Guajardo-Flores, D., & Cruz-Huerta, E. (2023). Impact of In Vitro Digestion on the Digestibility, Amino Acid Release, and Antioxidant Activity of Amaranth (Amaranthus cruentus L.) and Cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen) Proteins in Caco-2 and HepG2 Cells. Antioxidants, 12(12), 2075. https://doi.org/10.3390/ANTIOX12122075/S1
15. Siow, H. L., & Gan, C. Y. (2016). Extraction, identification, and structure–activity relationship of antioxidative and α-amylase inhibitory peptides from cumin seeds (Cuminum cyminum). Journal of Functional Foods, 22, 1–12. https://doi.org/10.1016/J.JFF.2016.01.011
16. Sun, C., Tang, X., Ren, Y., Wang, E., Shi, L., Wu, X., & Wu, H. (2019). Novel Antioxidant Peptides Purified from Mulberry (Morus atropurpurea Roxb.) Leaf Protein Hydrolysates with Hemolysis Inhibition Ability and Cellular Antioxidant Activity. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 67(27), 7650–7659. https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.9B01115
17. Toimbayeva, D., Saduakhasova, S., Kamanova, S., Kiykbay, A., Tazhina, S., Temirova, I., Muratkhan, M., Shaimenova, B., Murat, L., Khamitova, D., & Ospankulova, G. (2025). Prospects for the Use of Amaranth Grain in the Production of Functional and Specialized Food Products. Foods 2025, Vol. 14, Page 1603, 14(9), 1603. https://doi.org/10.3390/FOODS14091603
18. Usman, M., Patil, P. J., Mehmood, A., Rehman, A., Shah, H., Haider, J., Xu, K., Zhang, C., & Li, X. (2022). Comparative evaluation of pseudocereal peptides: A review of their nutritional contribution. Trends in Food Science & Technology, 122, 287–313. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.02.009
19. Vincenzi, M., Mercurio, F. A., & Leone, M. (2024). Virtual Screening of Peptide Libraries: The Search for Peptide-Based Therapeutics Using Computational Tools. International Journal of Molecular Sciences 2024, Vol. 25, Page 1798, 25(3), 1798. https://doi.org/10.3390/IJMS25031798
20. Wang, D., Jin, J., Li, Z., Wang, Y., Fan, M., Liang, S., Su, R., & Wei, L. (2024). StructuralDPPIV: a novel deep learning model based on atom structure for predicting dipeptidyl peptidase-IV inhibitory peptides. Bioinformatics, 40(2). https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTAE057
21. Zou, T.-B., He, T.-P., Li, H.-B., Tang, H.-W., & Xia, E.-Q. (2016). The structure-activity relationship of the antioxidant peptides from natural proteins. Molecules, 21(1), 72. https://doi.org/10.3390/molecules21010072

DEGRADACIÓN DE CAFEÍNA POR MICROORGANISMOS AISLADOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO HUMEDO (FERMENTACIÓN) DEL CAFÉ

Mariana Calva-Pérez[1], Minerva Rosas-Morales[1], Ada María Ríos-Cortés,[1] Wendy Juanico-Flores[2]

[1]Instituto Politecnico Nacional. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, CIBA-IPN, Instituto Tecnológico de Atlixco [2].
mcalvap2500@alumno.ipn.mx

RESUMEN

La cafeína, mejor conocida como el alcaloide purínico del café, actúa como contaminante emergente por su gran persistencia ambiental derivada de la estructura xantínica (Borges *et al*., 2020). Microorganismos como *Pseudomonas* y *Rhodococcus* utilizan la vía de N-demetilación y oxidación para degradarla (Maharajh *et al.,* 2019; Nayak *et al.,* 2021), lo que los convierte en microorganismos potenciales para su uso en biorremediación. El objetivo de la investigación fue seleccionar microorganismos que usen a la cafeína como única fuente de carbono a partir de una colección microbiana de 100 cepas puras (conservadas en glicerol a −70 °C), aisladas durante el proceso de beneficiado húmedo del café (fermentación). Las cepas se sembraron en medio LB (control) y LB + cafeína (1 g/L), se incubaron 48 h a 30 °C. Se evaluó el crecimiento en los medios de cultivo (colonias evidentes); posteriormente se seleccionaron las que crecieron en el medio con cafeína y se caracterizaron bioquímicamente (prueba de catalasa, indol, nitratos, ureasa y Kliger). De las 100 cepas, solo el 20% crecieron exclusivamente en medio LB + cafeína vs. LB (control), confirmando el uso específico de este alcaloide como fuente de carbono. De estas 20 cepas, 9 mostraron perfiles distintivos: 5 con catalasa positiva (aerobias/facultativas), todas indol y nitratos negativas (sin anaerobiosis), 3 cepas ureasa positiva y 3 Kliger negativas (no fermentativas). A través del cribado diferencial en medios LB y LB + cafeína, aplicado al ceparío, fue posible identificar de manera eficiente degradadores específicos de cafeína. Destacan particularmente 9 cepas aeróbicas, metabólicamente adaptadas a dicho compuesto, como candidatos prometedores para su uso en la biorremediación de los efluentes líquidos generados durante el beneficiado húmedo del café, aprovechando su resistencia natural e innata para la degradación de contaminantes (Vauloup & Cébron, 2025)

INTRODUCCIÓN

Constituyendo entre el 1-2% del peso seco del grano, la cafeína es un alcaloide purínico cuya estructura xantínica le otorga una notable estabilidad química y persistencia en el medio ambiente, posicionándola como un contaminante emergente de relevancia mundial (Borges *et al.,* 2020; VirtualPro, 2024). En América Latina, el beneficiado húmedo del café es una tecnología postcosecha para la obtención de café pergamino, que consiste en cuatro etapas:

- Despulpado: Remoción del epicarpio y mesocarpio externo (pulpa) (Mongabay, 2022)
- Fermentación: Proceso mediado por microbiota nativa (levaduras y bacterias lácticas) para hidrolizar las pectinas del mucílago (Mongabay, 2022).
- Lavado: Uso de agua para remover residuos del mucílago degradado (Mongabay, 2022).
- Secado: Deshidratación hasta alcanzar un 10-12% de humedad (Mongabay, 2022).

Sin embargo, esta técnica emplea un alto consumo de agua y la producción de considerables volúmenes de residuos líquidos con una elevada carga orgánica (Aldeser, 2025), estos efluentes se contaminan con sustancias como cafeína, ácidos orgánicos, taninos, fenoles y polifenoles (Terral Latinoamericana, 2021).

Dichos compuestos ejercen un efecto inhibitorio sobre la actividad biológica de los cuerpos de agua receptores, provocando una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y un impacto negativo sobre la biota acuática (SciELO México, 2021). Habitualmente, los efluentes son descargados sin tratamiento previo en ríos y suelos, caracterizándose por una elevada acidez (pH ácido), una alta demanda química de oxígeno (DQO)y una limitada biodegradabilidad natural, pues el residual logra solo 18.4% de remoción de DQO en digestión anaerobia) (Aldeser, 2025; SciELO México, 2021). Asimismo, la presencia de cafeína y compuestos fenólicos compromete la estabilidad biológica de los ecosistemas, representando una problemática ambiental de gran relevancia en las áreas dedicadas al cultivo y procesamiento de café (SciELO México, 2021). A pesar de estos desafíos, los subproductos del café, como la pulpa y la cascarilla, albergan una microbiota especializada, incluyendo bacterias del género *Bacillus*, con potencial metabólico para la de-polimerización y valorización de estos residuos (Pagliarini *et al.,* 2023).

La biorremediación microbiana representa una estrategia sostenible para el tratamiento de la cafeína y otros contaminantes orgánicos. Microorganismos como *Pseudomonas* y *Rhodococcus* logran degradar este compuesto mediante rutas metabólicas de N-demetilación y oxidación en C-8, transformándolo en subproductos no tóxicos (CO_2 y NH_3) (Maharajh *et al.,* 2019; Nayak *et al.*, 2021). Particularmente, las cepas nativas obtenidas del proceso de fermentación del café poseen una ventaja adaptativa; su exposición constante a la cafeína y a compuestos fenólicos en el entorno original les confiere una resistencia innata y una mayor eficacia en la degradación de estos agentes contaminantes (Lal café, 2024; UDES, 2022).

La presente investigación tuvo como objetivo seleccionar y caracterizar microorganismos con capacidad para metabolizar la cafeína como fuente de carbono, a partir de un banco de 100 cepas aisladas durante el proceso de beneficiado húmedo del café. Dada la alta especialización metabólica requerida para degradar compuestos xantínicos en matrices complejas, esta estrategia aprovecha el potencial de la microbiota nativa, cuya adaptación a los residuos agroindustriales le confiere una ventaja competitiva frente a cepas de referencia. El procedimiento contempla la evaluación del crecimiento microbiano en medios selectivos, la caracterización bioquímica de los aislamientos y la identificación de las cepas con mayor capacidad biotecnológica para la biorremediación *in situ* de los efluentes derivados de esta actividad.

TEORÍA

LA CAFEÍNA: ESTRUCTURA, PROPIEDADES Y PERSISTENCIA AMBIENTAL

La cafeína, un alcaloide perteneciente a la clase de las metilxantinas (1,3,7-trimetilxantina), se define molecularmente por la fórmula química. Su estructura xantínica, caracterizada por un sistema bicíclico de purina sustituido, le confiere una notable estabilidad termodinámica y una marcada recalcitrancia frente a la biodegradación convencional (Rudolph *et al.,* 2025; Sandoo Pharma, 2023). Con una masa molecular de 194.19 g/mol y una alta solubilidad en agua, este compuesto no solo persiste en el medio acuático, sino que su movilidad facilita su dispersión; físicamente, se presenta como un polvo inodoro o cristales blancos aciculares, propiedades que, al combinarse, subrayan la urgencia de desarrollar estrategias biotecnológicas eficaces para su mitigación (Rudolph *et al*., 2025). La cafeína se reconoce actualmente como un contaminante emergente debido a su detección recurrente en vertidos residuales, su notable solubilidad acuosa y los efectos adversos que provoca en la biota acuática, incluso a concentraciones traza (Svensson & Berg, 2017; Singh *et al.,* 2024). Su prevalencia se ha documentado a escala global en diversos cuerpos de agua, abarcando desde fuentes superficiales y suministros de agua potable hasta ecosistemas fluviales, lacustres y marinos (Svensson & Berg, 2017). En virtud de su persistencia y comportamiento hidrofílico, este compuesto se emplea frecuentemente como un trazador químico de la actividad antropogénica, consolidándose como una herramienta diagnóstica fundamental en los estudios de impacto ambiental (Singh *et al.,* 2024).

La persistencia ambiental de la cafeína está determinada significativamente por las condiciones fisicoquímicas del medio. En ausencia de radiación, la vida media de este alcaloide puede exceder

las cuatro semanas; sin embargo, bajo condiciones de irradiación solar simulada (análogo de condiciones naturales), la degradación fotoquímica se acelera, reduciendo dicho intervalo a 2.3–16.2 días (West *et al.,* 2023). La presencia de materia orgánica disuelta desempeña un rol protector al actuar como filtro óptico que absorbe la radiación incidente, limitando la fotólisis y favoreciendo la estabilidad del compuesto (West *et al.,* 2023). Estos hallazgos demuestran que, si bien la fotólisis es una ruta de degradación relevante en sistemas acuáticos superficiales expuestos a luz, la falta de iluminación favorece la persistencia del compuesto, prolongando su tiempo de residencia en el medio ambiente desde semanas hasta meses (West *et al.,* 2023). Esta persistencia ambiental, combinada con su alta solubilidad y detección frecuente en cuerpos de agua, convierte a la cafeína en un contaminante emergente de preocupación, ya que su exposición tiene efectos nocivos en organismos acuáticos incluso a bajas concentraciones, afectando sus funciones metabólicas y fisiológicas con variaciones en sensibilidad entre especies (Mongabay, 2022; Vieira *et al.,* 2025).

Vías metabólicas y genética de la degradación microbiana de la cafeína

La degradación de la cafeína a través de sistemas biológicos bacterianos ocurre principalmente por la vía de la N-demetilación, en esta ruta catabólica existe una remoción de los grupos metilo presentes en los nitrógenos del anillo purínico, dando paso a la conversión de cafeína en teobromina (3, 7- dimetilxantina), o en algunas cepas, en teofilina (1, 3- dimetilxantina), gracias a la acción de la enzima cafeína N-demetilasa (Mazzafera, 2002). Posteriormente, el proceso de desmetilaciones subsecuentes, transforman estos intermediarios en 3-metilxantina o 7-metilxantina, dando paso a la formación de xantina (Gummadi *et al.,* 2012). Ahora bien, una vez obtenida la xantina, el metabolismo celular mediante la oxidación en la posición C-8, que es catalizado por la enzima xantina oxidasa, lo que transforma esta molécula en ácido úrico (Yamaoka-Yano & Mazzafera, 1999). Finalmente, el ácido úrico entra a la vía de la alantoína, donde se obtienen dióxido de carbono y amoníaco, compuestos que la célula ocupa como fuente de carbono y nitrógeno. Esta capacidad de utilizar la cafeína como sustrato metabólico, está adquirida en una variedad de cepas microbianas, entre ellas bacterias del género *Pseudomonas*, particularmente *Pseudomona putida, Rhodococcus, Bacillus* y *Klebsiella* (Dash & Gummadi, 2006). Por otra parte, en cuanto al reino fungi, predominan hongos filamentosos del género *Aspergillus*, como *Aspergillus niger,* destacando por su gran tolerancia a altas concentraciones de este alcaloide (Mussatto *et al.,* 2011).

Desde el punto de vista de la biología molecular, el aparato genético que codifica para estas desmetilasas específicas está organizado en operones regulados por la presencia de este sustrato, diversos estudios han reportado la implicación de genes de la familia ndm (*ndmA, ndmB y ndmC*) (Summers *et al.,* 2012), además se han reportado la participación de genes tipo *nah* o plásmidos catabólicos, los cuales otorgan las características necesarias para hidrolizar enlaces N-metilo (Dash & Gummadi, 2006).

Proceso de beneficiado húmedo del café y generación de efluentes

El proceso de beneficiado húmedo es una de las tecnologías postcosecha más populares para la obtención de café pergamino. Es un proceso que se divide en cuatro etapas enfocadas a la separación del grano de sus cubiertas externas. En primera instancia, las cerezas maduras seleccionadas son sometidas al proceso de despulpado, es decir, se remueve el epicarpio y el mesocarpio externo (pulpa), dejando el grano únicamente cubierto por el mesocarpio interno o mucílago, capa hidrofílica rica en pectinas y azúcares (Mussatto *et al.,* 2011). Posteriormente, los granos se llevan a tanques para el proceso de fermentación, dicho proceso biológico, es mediado por la microbiota nativa encontrada en la cereza, compuesta principalmente por consorcios de levaduras y bacterias lácticas, las cuales tienen la capacidad de hidrolizar enzimáticamente las pectinas del mucílago, disminuyendo su viscosidad para facilitar su desprendimiento (Avallone *et al.,* 2001), posterior a este proceso, se procede al lavado, donde se utiliza agua purificada para arrastrar y remover por completo los residuos del mucílago antes degradado. Finalmente, el café lavado entra a la etapa de secado, donde es deshidratado mediante exposición solar o secado mecánico hasta lograr una humedad de entre el 10-12%.

En la gran mayoría de las regiones productoras, existe una carencia de sistemas de tratamiento viables, propiciando el vertido directo de estos efluentes o residuos, generando problemas de contaminación en ríos y suelos (Dinsdale *et al.,* 1997). Estos efluentes son caracterizados por tener una acidez extrema, con valores de pH entre 3.5 y 4.5, además de una demanda química de oxigeno superior a la de los vertidos domésticos convencionales, debido a la alta solubilización de azúcares y componentes del mucílago (Rodríguez- Valencia *et al.,* 2000), entre ellos destacando la cafeína, alcaloide purínico que inhibe el desarrollo vegetal, así como una afección neurotóxica en microorganismos y fauna nativa (Mazzafera, 2002). La acumulación de compuestos alcaloides y xenobióticos trae consigo la alteración de la microbiota benéfica y diferentes efectos fitotóxicos, teniendo como consecuencia el retraso en la germinación de especies vegetales y una pérdida de la fertilidad de los suelos a largo plazo (Mazzafera, 2002).

Biorremediación aplicada a efluentes cafetaleros mediante el uso de cepas nativas

La biorremediación es definida como una biotecnología para aprovechar el potencial metabólico de microorganismos o sus enzimas para transformar o degradar compuestos orgánicos complejos en estructuras menos tóxicas (Alexander, 1999). Este proceso presenta ventajas competitivas frente a los diferentes métodos convencionales, principalmente por el bajo costo operativo y de instalación y sobre todo, la sostenibilidad ambiental, pues esta no genera subproductos o residuos tóxicos, al contrario, promueve la mineralización de la materia orgánica (Gawlik & Alvarez, 2013). Es por esto, que una estrategia prometedora para la mitigación de este impacto ambiental es la inoculación de cepas microbianas previamente seleccionadas que posean capacidad catabólica para degradar compuestos específicos, como la cafeína (Herrero & Stuckey, 2015). Múltiples investigaciones reportan que el aislamiento de cepas nativas provenientes del proceso de fermentación tiene una ventaja adaptativa importante (Avallone *et al,* 2001). Por lo tanto, su introducción masiva en forma de inóculos en reactores o una estabilización de la cinética de degradación, reduce la fase de latencia, garantizando una mejor estabilidad frente a las características complejas de los efluentes cafetaleros (Campos *et al.,* 2014).

Las bacterias, particularmente del género *Pseudomonas* (incluyendo especies como *P. putida* y *P. aeruginosa*), exhiben una notable versatilidad metabólica que permite una rápida y eficiente degradación de la cafeína en medios líquidos, consolidándose como agentes clave para la biorremediación de efluentes.

- Metabolismo y asimilación de nitrógeno: Para gran parte de estos microorganismos, la cafeína no constituye un sustrato de carbono óptimo; no obstante, representa una excelente fuente de nitrógeno. A través de rutas de N-demetilación secuencial, estas bacterias liberan el nitrógeno contenido en el anillo xantínico, incorporándolo en su metabolismo celular para satisfacer demandas nutricionales (Folz *et al.*, 2023).
- Plásmidos de degradación y plasticidad genética: En numerosas cepas, los genes que codifican las enzimas demetilasas se localizan en plásmidos. Esta organización génica no solo proporciona una ventaja adaptativa en entornos enriquecidos con cafeína, sino que facilita la transferencia horizontal de esta capacidad catabólica a otras poblaciones bacterianas, fortaleciendo la resiliencia del consorcio microbiano frente a la presión selectiva del contaminante (Vieira *et al.*, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Colección microbiana

Se trabajo con una colección microbiana constituida por 100 cepas puras aisladas durante el proceso de beneficiado húmedo del café (fermentación). Las cepas se conservaron en glicerol al 20% (v/v) a -70 °C hasta su uso y reactivación. La colección fue recuperada durante el proceso de beneficiado húmedo del café en el año 2024 y 2025 por el IBT. Alessandro Cocoletzi en su trabajo de maestría a partir de muestras de la zona cafetalera de la sierra nororiental, en la comunidad de Totutla Puebla

México. La colección está compuesta por bacterias y levaduras nativas con potencial degradador de cafeína.

Materiales y reactivos

Medios de cultivo

MEDIO	COMPOSICIÓN	FUNCIÓN
LB (Luria-Bertani)	Peptona 10 g/L, extracto de levadura 5 g/L, NaCl 10 g/L, agar 15 g/L.	Medio de control para verificar viabilidad de las cepas.
LB + Cafeína	LB + cafeína 1 g/L	Medio de selección para identificar degradadores de cafeína.
Medios para pruebas bioquímicas	Caldo tripticasa-soya, caldo glucosado con nitratos, urea-agar, Kligler Iron Agar	Caracterización bioquímica de cepas seleccionadas.

La cafeína fue adquirida con el proveedor comercial Zigam Aldrich, fue adicionada al medio LB en concentración final de 1 g/L posterior a esterilizar el medio de cultivo en el autoclave (121°C, 15 min) y dejando enfriar DE 45-50 °C para evitar la degradación térmica.

Reactivos para pruebas bioquímicas

PRUEBA	REACTIVO
Catalasa	Peróxido de hidrógeno al 3%
Indol	Reactivo de Kovac (p-dimetilaminobenzaldehído en amilo alcohol)
Nitratos	Reactivo A (sulfanilamida en ácido fosfórico) + Reactivo B (α-naftilamina)
Ureasa	Agar con urea
Kliger	Kliger Iron Agar

Métodos
Reactivación de las cepas

1. La colección microbiana conservada en glicerol se reactivó mediante siembre en placas de agar LB.
2. Las placas se incubaron a 30°C durante 24-48 horas.
3. Se seleccionaron colonias aisladas para usar como inóculo en el cribado.
4. Se realizó un cribado (por triplicado) diferencial comparando el crecimiento de las cepas en dos medios (LB y LB + Cafeína)
5. Se preparó un inóculo estándar de cada una de las cepas en caldo LB hasta alcanzar turbidez equivalente a 0.5 en la escala de McFarland (~1.5×10^8 UFC/mL)
6. Se sembró 10 µL del inóculo en cada placa usando el método de agotamiento en cuadrantes para la obtención de colonias aisladas.
7. Las placas se incubaron a 30°C durante 48 horas.
8. Posteriormente a la incubación, se evaluó el crecimiento en placa, basándonos en un criterio de selección.

CRITERIO	INTERPRETACIÓN
Crece en medio LB y LB+ Cafeína	Cepa viable, con capacidad de utilizar la cafeína como fuente de carbono.
No crece en LB + Cafeína	Cepa no descartada, no degradadora de cafeína

Se seleccionaron las cepas con crecimiento visible en LB + Cafeína, independientemente del crecimiento en el control LB. De las cepas que crecieron en este medio antes mencionado, se realizó

una caracterización bioquímica para la determinación de su perfil fisiológico. Se realizaron 5 pruebas estándar.

Prueba de catalasa
Principio: Detección de la enzima catalasa que descompone el H_2O_2 en $H_2O + O_2$, teniendo burbujeo como reacción positiva.

1. Se tomó una colonia fresca de la cepa y se colocó en un portaobjetos limpio.
2. Se agregó 1 gota de H_2O_2 al 3%.
3. Se observó formación de burbujas de forma inmediata.

Prueba de indol
Principio: Detección de triptofanasa que hidroliza triptófano a indol.

1. Se inoculó la cepa en caldo tripticasa-soya por 24-48 horas a 30°C.
2. Se agregó 0.5 ml de reactivo de Kovac.
3. Se observó la formación de un anillo en la superficie.

Prueba de nitratos
Principio: Evaluación de la capacidad de reducir nitratos (NO_3^-) a nitritos (NO_2^-) o gases (N_2, NO).

1. Se inoculó la cepa en caldo con nitrato de potasio 0.1% por 24-48 horas a 30°C
2. Se agregaron 0.5 ml de Reactivo A (sulfanilamida en ácido fosfórico) + 0.5 ml de Reactivo B (α-naftilamina).
3. Si no se presentó una coloración, se agregó zinc en polvo para la confirmación de nitrato no reducido.

Prueba de ureasa
Principio: Detección de ureasa que hidroliza urea a amonio (NH_4^+) + CO_2, aumentando el pH.

1. Se inoculó la cepa en agar urea por 24-48 horas a 30°C.
2. Se observó el cambio de color del indicador de pH (rojo fenol).

Prueba de Kliger Iron Sugar
Principio: Evaluación de fermentación de glucosa/lactosa y producción de H_2S.

1. Se inoculó la cepa en agar hierro de Kliger por estría en superficie.
2. Se incubó a 30°C por 24-48 horas.
3. Se observó la coloración y presencia de color negro H_2S.
4.

Análisis de datos y selección de cepas destacadas

1. Se realizó una tabla con los resultados de los crecimientos en LB y LB + Cafeína para la colección microbiana (100 cepas).
2. Se calculó el porcentaje de cepas degradadoras (cepas con crecimiento en LB + Cafeína /100) x 100.
3. De las cepas degradadoras, se hizo el agrupamiento por perfil bioquímico similar.
4. Se seleccionaron las cepas con perfiles distintivos o característicos (catalasa +, indol -, nitratos -, ureasa +/-, kliger -) como posibles candidatas para biorremediación.

RESULTADOS

De la colección (100 cepas) se esperaba identificar microorganismos que fueran capaces de utilizar la cafeína como fuente de carbono. Los resultados obtenidos fueron:

MEDIO DE CULTIVO	# DE CEPAS CON CRECIMIENTO	PORCENTAJE
LB (control)	100	100%
LB + Cafeína (1 g/L)	20	20%
Exclusivamente en LB + Cafeína	20	20%

De 100 cepas, el 20% crecieron en el medio con cafeína, confirmando su potencial degradador específico de cafeína, el 80% restante no pudo utilizar la cafeína como fuente de carbono y se descartó. Las 20 cepas seleccionadas mostraron crecimiento visible en LB + Cafeína después de una incubación de 48 horas a 30°C, todas crecieron en medio LB (control) confirmando su viabilidad. De las 20 cepas degradadoras de cafeína, se realizó una caracterización bioquímica, los resultados se presentan en la siguiente tabla:

CEPA	CATALASA	INDOL	NITRATOS	UREASA	KLIGER	PERFIL FISIOLÓGICO
1	+	-	-	+	-	Aerobio, ureasa +, no fermentativo
2	+	-	-	+	-	Aerobio, ureasa +, no fermentativo
3	+	-	-	+	-	Aerobio, ureasa +, no fermentativo
4	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
5	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
6	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
7	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
8	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
9	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
10	-	+	+	-	+	Anaerobio facultativo, fermentativo
11	-	+	+	-	+	Anaerobio facultativo, fermentativo
12	-	-	+	-	+	Facultativo, fermentativo
13	+	-	-	-	+	Aerobio, fermentativo
14	+	-	-	-	+	Aerobio, fermentativo

15	-	+	-	-	-	Aanerobio, ureasa +, no fermentativo
16	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
17	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
18	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
19	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo
20	+	-	-	-	-	Aerobio, ureasa -, no fermentativo

Tabla 1. Pruebas bioquímicas para las 20 cepas degradadoras de cafeína. Elaboración propia

Catalasa + = aerobio/facultativo; Indol + = *Enterobacteriaceae*; Nitratos + = capacidad de reducción de nitratos (anaerobiosis); Ureasa + = hidrólisis de urea; Kliger - = no fermentativo (metabolismo oxidativo).

De las 20 cepas degradadoras, se identificaron 9 cepas con perfiles fisiológicos distintivos que las vuelven prometedoras para el proceso de biorremediación:

CEPA	CATALASA	INDOL	NITRATOS	UREASA	KLIGER	CARACTERÍSTICAS
1	+	-	-	+	-	Aerobia, ureasa +, no fermentativa
2	+	-	-	+	-	Aerobia, ureasa +, no fermentativa
3	+	-	-	+	-	Aerobia, ureasa +, no fermentativa
4	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa
5	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa
6	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa
7	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa
8	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa
9	+	-	-	-	-	Aerobia, ureasa –, no fermentativa

Tabla 2. Perfiles de las cepas destacadas. Elaboración propia.

Interpretación prueba de catalasa:

- Positivo: burbujeo inmediato (presencia de catalasa: microorganismos aerobios/facultativos).
- Negativo: sin burbujas (anaerobios estrictos).

Interpretación prueba de indol:

- Positivo: Anillo rojo/rosa (presencia de indol, microorganismos *Enterobacteriaceae)*
- Negativo: anillo amarillo (ausencia de indol)

Interpretación:

- Positivo: Color rojo después de agregar reactivos (reducción de nitratos a nitritos).
- Negativo: sin coloración (sin reducción de nitratos).

Interpretación:

- Positivo: Color rosa/rojo intenso (hidrolisis de urea)
- Negativo: Color amarillo/naranja (sin hidrólisis de urea)

Interpretación:

- Glucosa: amarillo (fermenta); Rojo (no fermenta)
- Lactosa: amarillo (fermenta); Rojo (no fermenta)
- H_2S: negro (produce H_2S); Sin coloración (no produce H_2S)
- Negativo: coloración roja

Discusión de resultados

El cribado en LB vs. LB + Cafeína fue eficiente para la identificación de microorganismos degradadores de cafeína específicos:

- 20% de las cepas fueron degradadoras de cafeína
- Este porcentaje es consistente con diferentes reportes encontrados en la literatura (Dash & Gummadi, 2022) entre el 10-30% de microorganismos de ambientes cafetaleros tienen la capacidad de degradar la cafeína.

Las 9 cepas destacadas presentan características prometedoras ideales para su aplicación en la biorremediación aeróbica:

Comparación con microorganismos reportados en la literatura

Las cepas seleccionadas tienen un perfil muy similar a *Pseudomonas* y *Rhodococcus*, bacterias que han sido reportadas como degradadoras de cafeína mediante la vía de N-demetilacion y oxidación en C-8, teniendo características como catalasa +: microorganismos aerobios como Pseudomonas, no fermentativos: tienen un metabolismo oxidativo como *Rhodococcus* e indol negativo, es decir, no son *Enterobacteriaceae*, diferente de *Klebsiella* que también tiene la característica de degradar cafeína pero es un microorganismo fermentativo.

Las cepas destacadas, son candidatas prometedoras para diferentes aplicaciones, entre ellas, el tratamiento de efluentes del beneficiado húmedo del café, es decir, son microorganismos nativos, ya están adaptadas a la cafeína, a la bioaumentación en tanques aeróbicos porque son aerobias estrictas, por lo tanto, son ideales para su uso en sistemas con aireación, además de la aplicación den consorcio de las 3 cepas ureasa +, estas pueden usar urea de los diferentes detergentes en aguas de limpieza.

CONCLUSIONES

El cribado diferencial fue exitoso, se lograron identificar 20 cepas degradadoras de cafeína (20% de eficiencia), de 100 cepas de la colección microbiana, 9 de estas 20 cepas tienen un perfil idóneo

para biorremediación, pues presentaron peculiaridades aerobias, no fermentativas y con resistencia a la cafeína, 3 cepas ureasa positivas son especialmente útiles para efluentes con alto contenido de urea, las cepas son nativas del proceso de fermentación, lo que les confiere la ventaja de adaptación sobre cepas exógenas, y finalmente, son candidatas prometedoras para el tratamiento de los diferentes efluentes líquidos del proceso de beneficiado húmedo del café mediante biorremediación aeróbica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aldeser. (2025). Valorización bioenergética de residuos del beneficiado húmedo de café. TERYS.
2. Borges, E., et al. (2020). Environmental contamination and persistence of caffeine. Environmental Science and Pollution Research, 27(12), 12345–12356.
3. Lal Café. (2024). Microorganismos que mejoran la calidad del café. Lallemand. https://www.lalcafebylallemand.com/es/recursos/otros-recursos/microbes-that-shape-coffee-flavour/
4. Maharajh, D., et al. (2019). Microbial N-demethylation pathways for caffeine degradation. Biotechnology Letters, 41(5), 567–575.
5. Nayak, S., et al. (2021). Oxidative degradation of xanthine alkaloids by soil bacteria. Journal of Applied Microbiology, 130(3), 789–798.
6. SciELO México. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo de café sobre la calidad del suelo. Revista Terra Latinoamericana. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792021000100139
7. Terral Latinoamericana. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café. Terra Latinoamericana. https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/es/article/view/884
8. UDES. (2022). Caracterización bacteria fermentadora en mucílago [Tesis, Universidad de Santander]. Repositorio UDES. https://repositorio.udes.edu.co
9. Vauloup, A., & Cébron, A. (2025). Development of a device to trap soil bacteria capable of degrading organic contaminants such as alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons. Journal of Hazardous Materials, 491, 137690. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137690
10. VirtualPro. (2024, octubre 31). La síntesis de cafeína y su mecanismo y aplicación mediante la degradación microbiana. https://www.virtualpro.co/articulos/la-sintesis-de-cafeina-y-su-mecanismo-y-aplicacion-mediante-la-degradacion-microbiana
11. HUMAN. (2019, octubre 12). Cafeína en nuestro suministro de agua: ¿Contaminan nuestros hábitos el medio ambiente? https://huma.us/es/medio-ambiente/cafeina-en-nuestro-suministro-de-agua-contaminan-nuestros-habitos-el-medio-ambiente/
12. Labster. (s. f.). Propiedades químicas de la cafeína. Theory pages. https://theory.labster.com/es/caffeines-chemical-structure/
13. Kleiven, M., & Olsen, K. (2003). Caffeine, an anthropogenic marker for wastewater contamination of surface waters. Environmental Science and Technology, 37(4), 691–700. https://doi.org/10.1021/es020125z
14. Mongabay. (2022, agosto 3). Cafeína: contaminante emergente de los ríos y aguas costeras del mundo. https://es.mongabay.com/2022/08/cafeina-contaminante-emergente-de-los-rios-y-aguas-costeras-del-mundo/
15. Rudolph, A., Korekar, G., & Stieβ, B. (2025). Estructura y propiedades de la cafeína [PDF]. Scribd. https://es.scribd.com/doc/90845516/Estructura-de-la-cafeina
16. Sandoo Pharma. (2023). Cafeína CAS No. 58-08-2. https://es.sandoopharma.com/news-show-1041068.html
17. Singh, R., Kumar, A., & Patel, N. (2024). Caffeine as an indicator of anthropogenic contamination in water bodies. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 40(1), 144–158. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992025000100144&script=sci_abstract
18. Svensson, J., & Berg, M. (2017). Cafeína como contaminante ambiental. Revista de Toxicología de AETOX. http://rev.aetox.es/wp/index.php/cafeina-como-contaminante-ambiental/

19. Vieira, L., Costa, R., & Silva, M. (2025). Impact of caffeine on aquatic ecosystems: Assessing trophic-level effects. PMC National Library of Medicine. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12193926/
20. West, A. G., Robertson, C. J., & Jones, D. M. (2023). The photolytic breakdown of caffeine and paracetamol residues in surface water. Water Environment Research, 95(8), e10909. https://doi.org/10.1002/wer.10909
21. Zhao, L., Chen, Y., & Wang, H. (2025). Caffeine removal in wastewater: A comprehensive review of current methods. Environmental Technology Reviews, 14(1), 594–612. https://doi.org/10.1080/21622515.2025.2512483
22. Avallone, S., Guyot, B., Brillouet, J. M., Olguin, E., & Guiraud, J. P. (2001). Microbiological and biochemical study of coffee fermentation. Current Microbiology, 42(4), 252–256. https://doi.org/10.1007/s002840010206
23. Campos, A. R., Aranda, D. A., & Medeiros, J. A. (2014). Environmental impacts and characterization of wastewater from wet processing of coffee: A review. Journal of Environmental Management, 142, 104–115.
24. Dinsdale, R. M., Hawkes, F. R., & Hawkes, D. L. (1997). Anaerobic digestion of coffee wet processing wastewater. Water Research, 31(9), 2243–2251. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00062-X
25. Mazzafera, P. (2002). Degradation of caffeine by microorganisms and plants. Phytochemistry, 60(1), 5–16. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00052-2
26. Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. Food and Bioprocess Technology, 4(5), 661–672. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z
27. Rodríguez-Valencia, N., Zambrano-Franco, D. A., & Pérez-Serna, J. A. (2000). Caracterización fisicoquímica de las aguas mieles del café. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
28. Dash, H. R., & Gummadi, S. N. (2006). Catabolism of caffeine and related purine alkaloids by microorganisms. Applied Microbiology and Biotechnology, 71(6), 761–770. https://doi.org/10.1007/s00253-006-0453-yGummadi, S. N., Bhavya, B., & Santhosh, R. (2012).
29. Alexander, M. (1999). Biodegradation and bioremediation (2nd ed.). Academic Press.
30. Campos, A. R., Aranda, D. A., & Medeiros, J. A. (2014). Environmental impacts and characterization of wastewater from wet processing of coffee: A review. Journal of Environmental Management, 142, 104–115.
31. Gawlik, B. M., & Alvarez, P. J. (2013). Bioremediation: An eco-friendly and sustainable technology for environmental clean-up. Environmental Science & Technology, 47(12), 6075–6086.
32. Herrero, M., & Stuckey, D. C. (2015). Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: A review. Chemosphere, 140, 119–128. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.033

PÉPTIDOS CON POTENCIAL ANTIHIPERTENSIVO Y ANTIDIABÉTICO DERIVADOS DE LA DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL IN SILICO DE PROTEÍNAS DE *Chenopodium Pallidicaule*

Marlenne Y. Lima-Silva[1], Orlando Arellano-Castillo[2], Angel de Jesús Martínez-Gutíerrez[3], Stephany Alvarado-Velásquez[1], Gloricel Serena-Romero[2], Armando J. Martínez[4], Rubí Viveros-Contreras[2], Elvia Cruz-Huerta[1]

[1]Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, [2]Centro de Investigaciones Biomédicas, Universidad Veracruzana, [3]Facultad de bioanálisis, Universidad Veracruzana, [4] Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana.
marlenneyadaril@gmail.com

RESUMEN

Los pseudocereales constituyen una fuente importante de proteínas, aminoácidos y compuestos bioactivos con funciones fisiológicas benéficas. Entre ellos, la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) ha despertado un creciente interés en la industria alimentaria debido a las características de sus semillas pequeñas y esféricas, las cuales presentan un alto valor biológico y nutricional. Este valor se atribuye principalmente a su elevado contenido proteico (15–19 %) y a su perfil equilibrado de aminoácidos esenciales. Además, la cañihua se considera una fuente potencial de péptidos bioactivos, a los que se les atribuyen efectos antihipertensivos, antidiabéticos, antioxidantes, antianémicos, hipocolesterolémicos, antimicrobianos, entre otros.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo predecir, mediante análisis *in silico*, la liberación de péptidos bioactivos derivados de proteínas de cañihua con potencial actividad antihipertensiva y antidiabética. Los péptidos evaluados se obtuvieron a partir de las secuencias proteicas registradas de *Chenopodium pallidicaule* mediante el programa UniProt, la digestión *in silico* se realizó utilizando Rapid Peptides Generator (Vason 3, Google Colab), la probabilidad de la bioactividad de los péptidos se estimó mediante el servidor web PeptideRanker (puntuación ≥ 0.80), la predicción de la bioactividad con MultiPep y finalmente la toxicidad con ToxinPred.

La digestión gastrointestinal in silico generó 630 secuencias peptídicas, de las cuales 21 fueron exclusivas de la fase gástrica, 277 exclusivas de la fase intestinal y 332 se identificaron en ambas fases. Entre ellos, 25 péptidos cortos (2 a 11 residuos de aminoácidos) exhibieron actividades antihipertensiva, antidiabética, antioxidante y antimicrobiana. En particular, los péptidos LYF, FSP, RF, WF, WL y WY mostraron puntuaciones elevadas (> 0.90), resistencia en ambas etapas de la digestión simulada y ausencia de toxicidad. Además, presentaron potenciales propiedades inhibidoras de la enzima convertidora de la angiotensina (ECA) y dipeptidil-peptidasa IV (DPP-IV) según MultiPep. Este estudio destaca el potencial de *Chenopodium pallidicaule* como fuente de péptidos bioactivos potenciales con efectos biológicos prometedores y su consumo podría representar una alternativa alimentaria para la prevención de enfermedades crónicas como la hipertensión y diabetes. Sin embargo, se requieren validaciones tanto *in vitro* como *in vivo* para confirmar su bioeficacia.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades no transmisibles (ENT) se definen como padecimientos de larga duración, de lenta progresión y degenerativos, que a largo plazo implica la necesidad de tratamientos y cuidados, dentro de estas enfermedades se encuentran la diabetes, el cáncer, las enfermedades pulmonares crónicas y las enfermedades cardiovasculares, estas últimas representaron la principal causa de muerte a nivel mundial en 2025. Entre los principales factores de riesgo que causan las ENT se encuentran la inactividad física, la edad avanzada, el sobrepeso u obesidad, el consumo de alcohol o tabaco y llevar una dieta poco saludable, por lo que, una de las principales estrategias para su prevención es la modificación de los hábitos alimenticios, incluyendo la ingesta de alimentos con

compuestos bioactivos en la dieta (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2019; OMS, 2025, OMS, 2026).

En los últimos años, el interés por el estudio y consumo de fuentes proteicas de origen vegetal como los pseudocereales ha aumento debido a su alto valor nutricional. Estos cultivos aportan proteínas de buena calidad, aminoácidos esenciales y son fuente importante de macro y micronutrientes clave para una alimentación adecuada. Además, su composición nutricional y la presencia de compuestos bioactivos los posicionan como ingredientes con potencial para contribuir, como parte de un patrón alimentario saludable, a la prevención de enfermedades metabólicas como la diabetes y la hipertensión (Vilcacundo et al., 2017).

Los pseudocereales son semillas que, aunque botánicamente no pertenecen a la familia de los cereales (Gramíneas) se utilizan y consumen de manera similar. Estos cultivos representan una alternativa relevante como fuentes de proteínas de origen vegetal y compuestos bioactivos, debido a su alto valor nutricional. Dentro de este grupo se encuentra la cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), un pseudocereal caracterizado por su contenido proteico superior al de varios cereales tradicionales y por el aporte de diversos compuestos bioactivos, entre ellos péptidos bioactivos, polifenoles, flavonoides y saponinas (Moscoso-Mujica et al., 2024).

Los péptidos bioactivos, se encuentran encriptados dentro de proteínas precursoras y pueden liberarse mediante digestión enzimática o procesos de hidrólisis. Su actividad biológica depende de características estructurales y fisicoquímicas, como la secuencia, longitud, composición de aminoácidos, carga e hidrofobicidad. Diversos estudios han asociado estos compuestos con efectos antioxidantes, antiinflamatorios, anticancerígenos, hipocolesterolémicos y antidiabéticos, lo que respalda su potencial como moléculas de interés para el desarrollo de alimentos funcionales y estrategias dietéticas orientadas a la prevención y control de ENT (Kaur et al., 2025; Reyes-Bautista et al., 2023).

La identificación de péptidos bioactivos liberados durante la digestión mediante metodologías convencionales puede requerir un alto consumo de tiempo, recursos técnicos y costos. En este contexto, la implementación de herramientas bioinformáticas con un enfoque in silico constituye una estrategia útil para acelerar la identificación preliminar de secuencias peptídicas con potencial funcional. Su aplicación contribuye a optimizar las etapas iniciales de investigación, al proporcionar una visión preliminar de los péptidos candidatos con mayor potencial biológico (Rivero-Pino et al., 2023).

A pesar del creciente interés en la cañihua como pseudocereal de alto valor nutricional, la evidencia sobre su potencial como fuente de péptidos bioactivos multifuncionales aún es limitada, especialmente en relación con las secuencias peptídicas que podrían liberarse durante la digestión gastrointestinal. En este contexto, el objetivo de este estudio fue predecir, mediante un enfoque in silico, la liberación de péptidos derivados de proteínas de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) y estimar su potencial bioactivo, con énfasis en la actividad antihipertensiva y antidiabética.

TEORÍA

Enfermedades crónicas no transmisibles

Las ENT constituyen uno de los principales problemas de salud pública a nivel global debido a su elevada prevalencia y a su contribución significativa a la mortalidad. En 2021, alrededor de 18 millones de personas a nivel mundial tuvieron una muerte prematura (antes de los 70 años) asociada con alguna de estas enfermedades. Dentro de los principales grupos de ENT se encuentran las enfermedades cardiovasculares, el cáncer, las enfermedades respiratorias crónicas y la diabetes. Entre los factores de riesgo más relevantes destacan la presión arterial elevada, el sobrepeso, la obesidad y las alteraciones en el metabolismo de la glucosa y los lípidos. La hipertensión se caracteriza por el aumento sostenido de la presión arterial y se considera cuando esta es igual o mayor a 140/90 mmHg. Por otro lado, la diabetes es una afección en la cual el organismo no produce

o no utiliza adecuadamente la insulina, lo que conduce a concentraciones elevadas de glucosa en sangre. Ambas enfermedades están estrechamente relacionadas, ya que comparten factores de riesgo y al coexistir, aumentan la probabilidad de infarto, accidente cerebrovascular o daño renal. Por ello, una de las estrategias para contribuir a su prevención es la modificación de los hábitos alimentarios y el consumo de alimentos con potencial funcional (OMS, 2025; Przezak et al., 2022).

Pseudocereales

Los pseudocerealeas se han consumido desde generaciones antiguas y en la actualidad, ha aumentado el interés por su estudio debido a su valor nutricional, caracterizado por un alto contenido de proteínas, aporte de aminoácidos esenciales incluida la lisina, vitaminas, minerales y ausencia de gluten. Dentro de los pseudocereales más comunes se encuentran la quinoa, el amaranto y el trigo sarraceno; sin embargo, existen otros cultivos infravalorados y subutilizados, como la cañihua, que destaca por su resistencia a condiciones ambientales extremas y por su composición nutricional (Morales et al., 2021).

Cañihua (*Chenopodium pallidicaule*)

La cañihua es un pseudocereal originario de regiones andinas de países como Perú y Bolivia, donde predominan condiciones climáticas extremas. Esta planta dicotiledónea pertenece a la familia Amaranthaceae y puede crecer a bajas temperaturas, además tolerara heladas, vientos y sequías. Sus semillas son pequeñas (1 a 2 mm) y se ha reportado que presentan humedad de 11.6 %, cenizas de 7.4 %, lípidos de 10.0 %, fibra de 5.8 %, carbohidratos de 50.9 % y proteínas de 16.7 %. Las proteínas están compuestas principalmente por albúminas, globulinas, prolaminas, glutelinas y su calidad se relaciona con un perfil equilibrado de aminoácidos como lisina, leucina, isoleucina y fenilalanina. Además, la cañihua es fuente de minerales como fósforo, potasio, calcio y azufre, así como de vitaminas A, E y del complejo B. Asimismo, debido a su contenido de compuestos bioactivos, se le han atribuido actividades biológicas como antioxidante, antianémica, antidiabética, antimicrobiana, antihipertensiva, entre otras (Moscoso-Mujica et al., 2024).



Figura 1. Semillas de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), referencia visual del pseudocereal. Fuente: elaboración propia.

Digestión gastrointestinal y liberación de péptidos bioactivos

Diversos estudios sugieren que las proteínas de pseudocereales, tras la acción de las enzimas de la digestión gastrointestinal pueden dar origen a péptidos con diferentes actividades biológicas (Chirinos et al., 2018). Los péptidos se forman cuando las proteínas se convierten en fragmentos más pequeños por acción de la digestión gastrointestinal, el proceso inicia en el estómago donde por acción del ácido clorhídrico las proteínas se desnaturalizan, es decir pierden su forma tridimensional, facilitando la acción de la enzima pepsina, primera encargada de fragmentar las proteínas, posteriormente pasan al intestino delgado donde las enzimas pancreáticas (tripsina y

quimotripsina) rompen enlaces peptídicos específicos, generando así a los péptidos bioactivos, los cuales se definen como fragmentos de menor tamaño procedentes de las proteínas, generalmente son de una longitud pequeña de 2 a 20 residuos de aminoácidos y de bajo peso molecular, características importantes ya que potencialmente les permite ejercer actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticancerígena, antihipertensiva y antidiabética, bioactividades que promueven la prevención y el control de ENT (Zaky et al., 2022; Reyes-Bautista et al., 2023).

Péptidos con actividad antihipertensiva (Inhibición de la ECA)

Debido al incremento de las enfermedades cardiovasculares, existe un creciente interés en la búsqueda de alimentos funcionales capaces de contribuir a la modulación de la presión arterial. En condiciones fisiológicas, cuando disminuye la presión arterial, el flujo renal o el equilibrio de Na+, el riñón produce renina, enzima encargada de convertir el angiotensinógeno en angiotensina I. Posteriormente, la enzima convertidora de angiotensina (ECA) convierte la angiotensina I en angiotensina II, molécula responsable de inducir vasoconstricción en el músculo liso vascular, estimular la secreción de aldosterona en la glándula suprarrenal e incrementar la reabsorción renal de H_2O y Na^+. Estos efectos favorecen el aumento de la presión arterial. Los péptidos antihipertensivos pueden actuar principalmente mediante la inhibición de la ECA o de la renina, bloqueando la formación o acción de angiotensina II. Asimismo, se ha reportado que los péptidos con residuos aromáticos en el extremo C-terminal y residuos hidrofóbicos en el extremo N-terminal pueden favorecer la interacción con la ECA (Zaky et al., 2022). Por lo tanto, inhibir la ECA representa una estrategia potencial para evitar que aumente la presión arterial y así contribuir al tratamiento de la hipertensión. Figura 2.

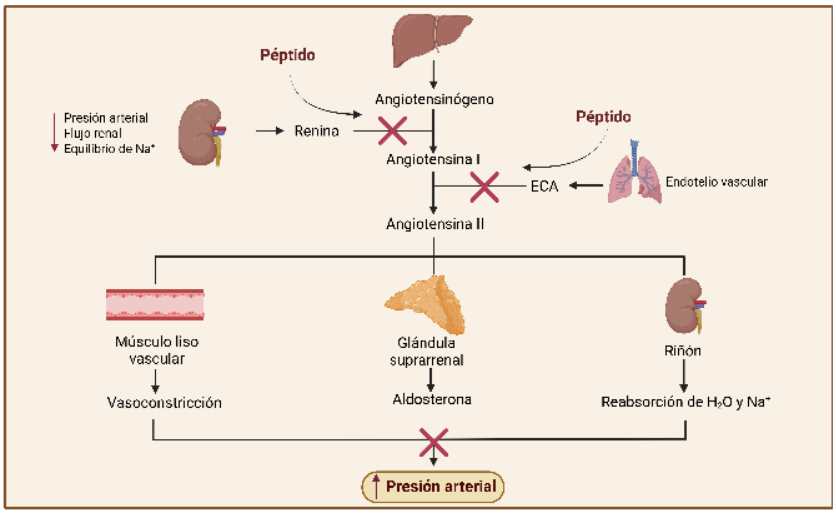


Figura 2. Mecanismo de acción de los péptidos antihipertensivos. Se muestra el principal mecanismo de acción de los péptidos bioactivos sobre el sistema renina–angiotensina–aldosterona (SRAA) inhibiendo la actividad de la renina y/o ECA, bloqueando la producción de angiotensina II y dando como resultado la disminución de la vasoconstricción, la secreción de aldosterona y la reabsorción renal de agua y sodio, impidiendo así el aumento de la presión arterial. Created in BioRender. Lima Silva, M. Y. (2026) https://BioRender.com/6mg48cx

Péptidos con actividad antidiabética (Inhibición de DPP-IV)

Los péptidos con potencial actividad antidiabética pueden modular procesos relacionados con el metabolismo de la glucosa, entre ellos la inhibición de la dipeptidil peptidasa IV (DPP-IV). En condiciones fisiológicas, después del consumo de alimentos, las incretinas son secretadas por el intestino, principalmente el péptido similar al glucagón tipo 1 (GLP-1) y el polipéptido insulinotrópico dependiente de glucosa (GIP). Estas hormonas participan en el control de la glucosa al estimular a las células β pancreáticas para la producción de insulina. Sin embargo, la acción de estas hormonas está limitada por su rápida inactivación por la DPP-IV. Por ello, los péptidos bioactivos con capacidad

inhibitoria de DPP-IV podrían prolongar la vida media de las incretinas y favorecer la regulación glucémica (Lacroix & Li-Chan, 2016).

Importancia del uso de herramientas *in silico* para la identificación de péptidos bioactivos

En los últimos años, los ensayos *in silico* y el uso de herramientas bioinformáticas han cobrado relevancia en el estudio de péptidos bioactivos debido a su capacidad para recuperar información a partir de secuencias proteicas disponibles en bases de datos, simular procesos de hidrólisis enzimática asociados con la digestión gastrointestinal y predecir posibles actividades biológicas de las secuencias peptídicas generadas. Además, estas herramientas permiten estimar características estructurales y fisicoquímicas relevantes, como longitud, peso molecular, carga, hidrofobicidad y posibles propiedades relacionadas con bioactividad y biodisponibilidad. Su aplicación contribuye a optimizar costos y tiempos en las etapas iniciales de investigación, al proporcionar una visión preliminar de los péptidos candidatos con mayor potencial funcional. No obstante, estos enfoques deben considerarse herramientas de cribado predictivo, por lo que sus resultados requieren confirmación posterior mediante ensayos *in vitro* e *in vivo* (Rivero-Pino et al., 2023).

PARTE EXPERIMENTAL

En la Figura 3 se muestra el esquema general de trabajo del procedimiento llevado a cabo para la realización del análisis *in silico*.

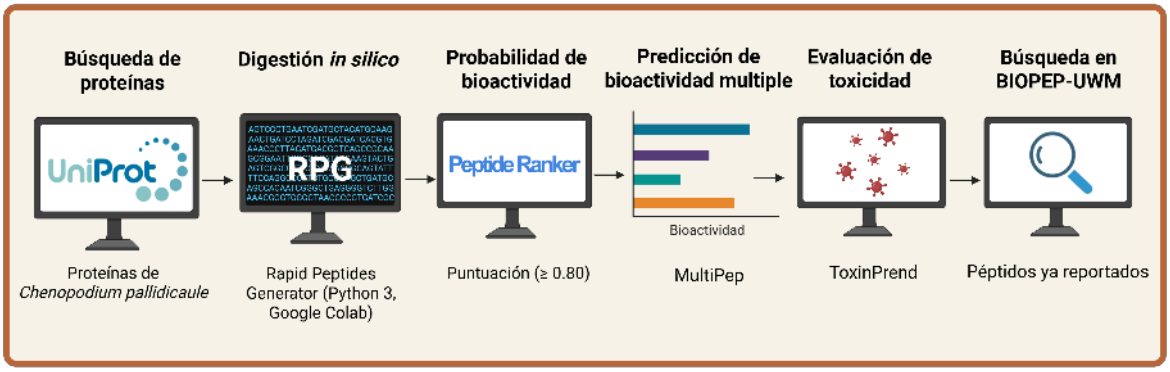


Figura 3. Esquema general de trabajo para el análisis *in silico* de proteínas de *Chenopodium pallidicaule*. Inicialmente, se realizó una búsqueda en la base de datos de Uniprot para recuperar las proteínas que serán seleccionadas para su posterior análisis *in silico*, posteriormente se realizó la digestión gastrointestinal mediante Rapid Peptide Generator (Python 3, Google colab), una vez obtenidos los péptidos generados a partir de la digestión se metieron a Peptide Ranker para predecir la probabilidad de que sean bioactivos y se eligieron únicamente los que tenían una puntuación ≥ 0.8, los péptidos elegidos se sometieron al programa de MultiPep para predecir la bioactividad múltiple de cada péptido, también se realizó un prueba de toxicidad mediante ToxinPred y finalmente se realizó una búsqueda en BIOPEP-UWM para confirmar si los péptidos obtenidos en el análisis *in silico* ya fueron reportados anteriormente. Created in BioRender. Lima Silva, M. Y. (2026) https://BioRender.com/6mg48cx

Digestión gastrointestinal *in silico* de proteínas de cañihua

Inicialmente se seleccionaron las secuencias proteicas de cañihua a partir de la base de datos UniProt, utilizando el identificador taxonómico *Chenopodium pallidicaule*, posteriormente se realizó la digestión gastrointestinal *in silico* a través de la plataforma de Google Colab, ejecutando la herramienta de RPG (Rapid Peptides Generator) implementada en un entorno de Python 3. Las proteínas recuperadas se organizaron y se procedió a iniciar la digestión gastrointestinal para simulando las condiciones proteolíticas utilizando enzimas, para la fase gástrica se utilizó pepsina y

para la fase intestinal tripsina y quimotripsina. Los péptidos resultantes de ambas etapas fueron recopilados para su posterior análisis *in silico*.

Evaluación del potencial bioactivo y toxicidad de los péptidos

La predicción de potencial bioactivo de los péptidos obtenidos después de la digestión *in silico* se realizó mediante Peptide Ranker y se seleccionaron únicamente los péptidos con una puntuación ≥ 0.8, los cuales se sometieron al software MultiPep (Grønning et al, 2021) para realizar la predicción de las diferentes actividades biologías seleccionando únicamente a los que mostraban una puntuación ≥ 0.8 para al menos una bioactividad, adicionalmente las secuencias preseleccionadas fueron evaluadas mediante ToxinPred (Rathore et al., 2024) para predecir su toxicidad y así descartar secuencias potencialmente toxicas, por último los péptidos obtenidos al final del todo el proceso se buscaron dentro de la base de datos BIOPEP-UWM para verificar si ya habían sido reportadas anteriormente, esta última etapa permitió verificar si los péptidos candidatos ya contaban con un registro de actividad biológica demostrado formalmente en la literatura científica.

RESULTADOS

Los datos obtenidos para la búsqueda en la base de datos de Uniprot para las proteínas de *Chenopodium pallidicaule* se muestran en la Tabla 1, se obtuvieron un total de 6 proteínas, la mayor con una longitud de 1122 aminoácidos y el menor con 36 residuos de aminoácidos, las proteínas fueron seleccionadas para su posterior análisis.

Organismo	Código de acceso	Longitud (aa)
Chenopodium pallidicaule	A0A193PN98	1122
	A0A0M5I7V8	605
	L0P195	508
	A0A0D3LSX7	45
	A0A060CS69	39
	A0A075MFM7	36

Tabla 1. Proteínas de *Chenopodium pallidicaule* obtenidas de la base de datos UniProt y seleccionadas para el análisis *in silico*.

Se realizó la simulación de la digestión gastrointestinal *in silico* mediante Rapid Peptide Generator para las proteínas de *Chenopodium pallidicaule* y se logró obtener un total de 630 péptidos distribuidos en la fase gástrica e intestinal, durante la fase gástrica con la hidrólisis de la pepsina se generaron un total de 21 péptidos, mientras que con la tripsina y quimotripsina en la fase intestinal se generaron un total de 277 péptidos, estos resultados coinciden con estudios donde reportan que la acción de las enzimas en la digestión gastrointestinal favorece a la liberación de péptidos bioactivos, especialmente después de la fase intestinal (Añón et al., 2024; Morales et al., 2021). Asimismo, se muestran los péptidos potencialmente activos con una puntuación ≥ 0.80, danto un total de 25 péptidos de los cuales 5 son gástricos, 5 intestinales y 15 péptidos resistentes a ambas fases de la digestión, la presencia elevada de péptidos resistentes sugiere la estabilidad que presentan los péptidos frente a las enzimas gastrointestinales aumentando la probabilidad de que ejerzan efectos bilógicos en el organismo (Rivero-Pino et al., 2023).

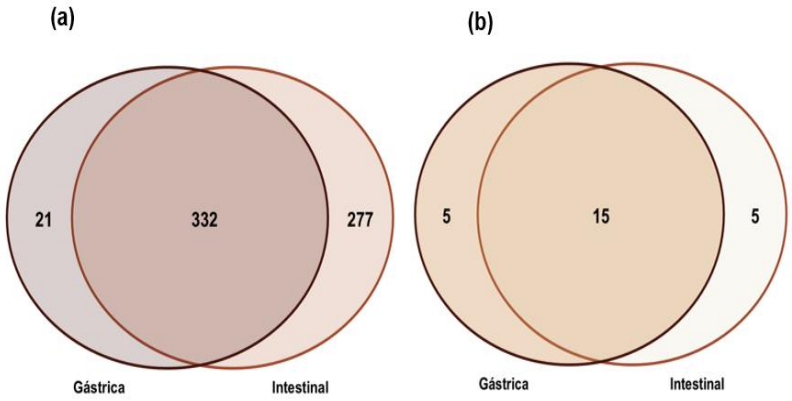


Figura 4. Diagramas de Venn que muestra la distribución de péptidos generados durante la digestión *in silico* de cañihua. (a) Péptidos únicos generados de cada fase (gástrica e intestinal) y la intersección de secuencias peptídicas. (b) Péptidos con posible bioactividad con score ≥ 0.8.

Asimismo, se realizó mediante el software de MultiPep la predicción de bioactividad múltiple de los péptidos con score ≥ 0.8, en particular, los péptidos LYF, FSP, RF, WF, WL y WY mostraron puntuaciones elevadas (> 0.90) además de presentar resistencia en ambas etapas de la digestión simulada. En la figura 5 se observa que la mayoría de péptidos son potencialmente antihipertensivos (Inhibición de la enzima ECA) y antidiabéticos (inhibición de la DPP-IV), ambas actividades han sido ampliamente estudiadas en péptidos bioactivos liberados después de la digestión en pseudocereales como la quinoa y el amaranto (Morales et al., 2021; Vilcacundo et al., 2017), donde sus efectos bioactivos se atribuyen principalmente a la presencia de aminoácidos hidrofóbicos y aromáticos en los extremos N- o C- ya que favorecen a la interacción con las enzimas aumentando así la capacidad de inhibirlas (Morales et al., 2021), estudios han reportado que aminoácidos como la fenilalanina o el triptófano tienen una alta capacidad inhibitoria de la ECA, mientras que aminoácidos como la leucina y prolina inhiben la DPP-IV (Lacroix & Li-Chan, 2016; Vilcacundo et al., 2017).

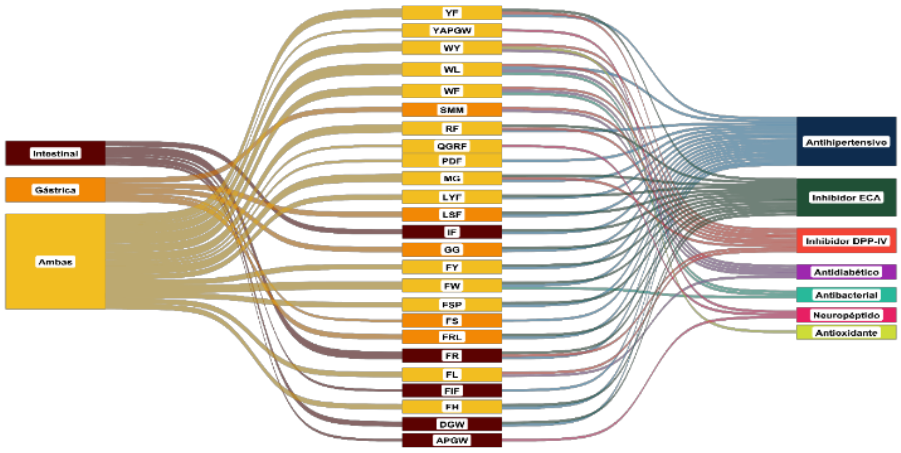


Figura 5. Representación de flujos (Sankey) de la predicción de las bioactividades de los péptidos liberados durante la digestión *in silico* de proteínas de cañihua con score ≥ 0.8. Las conexiones muestran la relación entre los péptidos liberados en la fase gástrica, intestinal y en ambas fases y sus bioactividades predichas.

En la Figura 6 se muestran las características estructurales de los péptidos identificados ya que estas son de gran importancia para determinar si son potencialmente bioactivos o no, en la Figura 6 (a) se observa que la mayoría de los péptidos son con una longitud corta (2 a 4 aminoácidos de longitud)

y de peso molecular bajo Figura 6(b), se ha reportado que la actividad biológica de los péptidos depende principalmente de las características estructurales del péptido como la longitud (número de residuos de aminoácidos en la cadena peptídica), la composición de aminoácidos y de cómo se encuentran estos ordenados en el péptido (Morales et al., 2021).

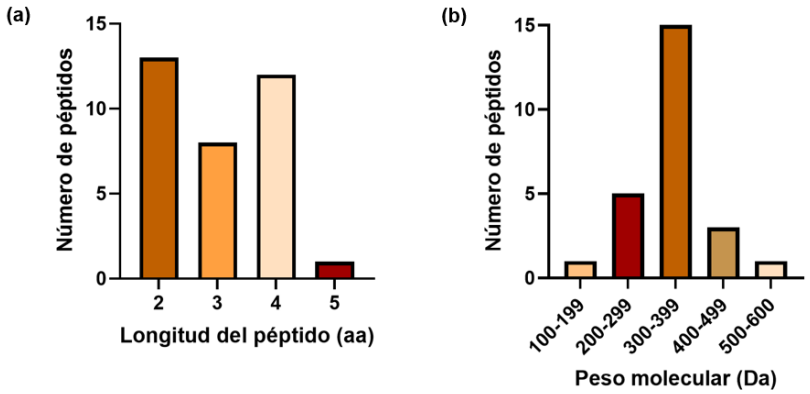


Figura 6. Distribución de los péptidos identificados en cañihua según sus características estructurales. (a) Distribución por longitud peptídica, expresada como número de aminoácidos; (b) distribución por peso molecular, expresado en daltons (Da).

Finalmente se realizó una búsqueda mediante la base de datos de BIOPEP-UWM para verificar si los péptidos identificados ya habían sido reportados anteriormente con alguna bioactividad y se observó que la mayoría de los péptidos identificados presentaban actividades antihipertensivas, antidiabéticas y antioxidantes (Tabla 2). En conjunto, la búsqueda sustenta las predicciones realizadas en este estudio, ya que la fuente de datos utilizada (BIOPEP-UWM) integra información experimental previamente validada acerca de péptidos bioactivos provenientes de diversas matrices biológicas, convirtiéndose en una herramienta vital para la identificación y caracterización de péptidos con actividad biológica (Minkiewicz et al., 2019), sin embargo es necesario validar mediante estudios *in vitro* e *in vivo* para confirmar su efecto biológico.

Proteína precursora	Péptido	Actividad biológica (BIOPEP-UWM)
Albúmina	YF	Antihipertensiva / Antioxidante
	WY	Antihipertensiva
	WL	Antihipertensiva
	WF	Antihipertensiva
	RF	Antihipertensiva / Antidiabética
	LYF	Antihipertensiva / Antioxidante
Globulina	YAPGW	Antihipertensiva
	QGRF	Antihipertensiva / Antidiabética
	PDF	Antihipertensiva
	APGW	Antihipertensiva

Tabla 2. Bioactividad de secuencias peptídicas de cañihua (*Chenopodium pallidicaule*) obtenidas en el análisis *in silico mediante* la base de datos BIOPEP-UWM. Se muestran los péptidos con actividades biológicas reportadas y validadas en la literatura científica.

CONCLUSIONES

La digestión in silico de proteínas de Chenopodium pallidicaule permitió identificar péptidos con alta probabilidad de bioactividad, principalmente de longitud corta y bajo peso molecular. Los péptidos seleccionados presentaron perfiles compatibles con potencial actividad antihipertensiva, antioxidante y antidiabética. Asimismo, el empleo de herramientas computacionales permitió predecir múltiples bioactividades y una baja toxicidad potencial, respaldando la utilidad de los enfoques in silico como estrategia preliminar para seleccionar péptidos candidatos con potencial funcional. Los resultados sugieren que las proteínas de cañihua constituyen una fuente potencial de péptidos candidatos con perfiles compatibles con actividad inhibitoria de la ECA y DPP-IV. No obstante, se requieren ensayos in vitro y modelos celulares in vivo para confirmar su liberación, estabilidad, bioactividad, biodisponibilidad y seguridad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chirinos, R., Ochoa, K., Aguilar-Gálvez, A., Carpentier, S., Pedreschi, R., & Campos, D. (2018). *Obtaining of peptides with in vitro antioxidant and angiotensin I converting enzyme inhibitory activities from cañihua protein (Chenopodium pallidicaule Aellen)*. *Journal of Cereal Science, 83*, 139–146. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.004
2. Grønning, A. G. B., Kacprowski, T., & Schéele, C. (2021). *MultiPep: A hierarchical deep learning approach for multi-label classification of peptide bioactivities*. *Biology Methods and Protocols, 6*(1), bpab021. https://doi.org/10.1093/biomethods/bpab021
3. Kaur, S., Pandey, P., Ghosh, A., Kumar, A., Sushmitha, J., Seem, K., Kaur, G., Bhardwaj, R., Singh, G., & Riar, A. (2025). *Pseudocereals for modern diets: Multifunctional grains with superior bioactive properties, nutraceutical potential, and diverse industrial applications*. *Food Chemistry Advances, 8*, 101066.
4. Lacroix, I. M. E., & Li-Chan, E. C. Y. (2016). *Food-derived dipeptidyl-peptidase IV inhibitors as a potential approach for glycemic regulation–Current knowledge and future research considerations*. *Trends in Food Science & Technology, 54*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.008
5. Minkiewicz, P., Iwaniak, A., Darewicz, M., Bucholska, J., & Hrynkiewicz, M. (2019). *BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: Current opportunities*. *International Journal of Molecular Sciences, 20*(23), 5978. https://doi.org/10.3390/ijms20235978
6. Morales, D., Miguel, M., & Garcés-Rimón, M. (2021). *Pseudocereals: A novel source of biologically active peptides*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61*(9), 1537–1544. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1761774
7. Moscoso-Mujica, G., Mujica, Á., Chura, E., Begazo, N., Jayo-Silva, K., & Oliva, M. (2024). *Kañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen), an ancestral Inca seed and optimal functional food and nutraceutical for the industry: A review*. *Heliyon, 10*(14), e34589. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34589
8. Organización Mundial de la Salud. (2019). *Enfermedades no transmisibles*. https://www.who.int/es/health-topics/noncommunicable-diseases
9. Organización Mundial de la Salud. (2025a). *Enfermedades no transmisibles*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases
10. Organización Mundial de la Salud. (2026). *Dieta saludable*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet
11. Peredo-Lovillo, A., Hernández-Mendoza, A., Vallejo-Cordoba, B., & Romero-Luna, H. E. (2022). *Conventional and in silico approaches to select promising food-derived bioactive peptides: A review*. *Food Chemistry: X, 13*, 100183. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100183
12. Przezak, A., Bielka, W., & Pawlik, A. (2022). *Hypertension and type 2 diabetes—The novel treatment possibilities*. *International Journal of Molecular Sciences, 23*(12), 6500. https://doi.org/10.3390/ijms23126500
13. Rathore, A. S., Choudhury, S., Arora, A., Tijare, P., & Raghava, G. P. S. (2024). *ToxinPred 3.0: An improved method for predicting the toxicity of peptides*. *Computers in Biology and Medicine, 179*, 108926. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108926

14. Reyes-Bautista, R., Barajas-Segoviano, M., Flores-Sierra, J. D. J., Hernández-Mendoza, G., & Xoca-Orozco, L. Á. (2023). *Biopéptidos derivados de los pseudocereales: Amaranto, quinoa, chía y trigo sarraceno*. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 26*. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.616
15. Rivero-Pino, F., Millan-Linares, M. C., & Montserrat-de-la-Paz, S. (2023). *Strengths and limitations of in silico tools to assess physicochemical properties, bioactivity, and bioavailability of food-derived peptides*. *Trends in Food Science & Technology, 138*, 433–440. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.023
16. Vilcacundo, R., Martínez-Villaluenga, C., & Hernández-Ledesma, B. (2017). *Release of dipeptidyl peptidase IV, α-amylase and α-glucosidase inhibitory peptides from quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) during in vitro simulated gastrointestinal digestion*. *Journal of Functional Foods, 35*, 531–539. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.024
17. Zaky, A. A., Simal-Gandara, J., Eun, J.-B., Shim, J.-H., & Abd El-Aty, A. M. (2022). *Bioactivities, applications, safety, and health benefits of bioactive peptides from food and by-products: A review*. *Frontiers in Nutrition, 8*, Article 815640. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.815640

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO EN CANAL DE CONEJOS ALIMENTADOS CON SUERO DE LECHE

Tarsicio Medina Saavedra, Lilia Mexicano Santoyo, Gabriela Arroyo Figueroa, Leslye María Nito Castillo

Departamento de Ingenierías, Campus Celaya Salvatierra, Universidad de Guanajuato.
l.mexicano@ugto.mx

RESUMEN

El aprovechamiento de subproductos de la industria alimentaria se ha convertido en una alternativa sostenible para mejorar la producción animal sin incrementar costos. Entre ellos, el suero de leche destaca por su valor nutritivo y por el potencial que ofrece al incorporarse en la dieta de especies menores. En los conejos, su inclusión podría modificar de manera importante el crecimiento y la eficiencia con la que transforman el alimento. Con este estudio se busca conocer cómo influye el suero de leche en el rendimiento en canal de los conejos y valorar los posibles beneficios productivos y económicos de su uso. El estudio se realizó con un diseño completamente al azar y cuatro tratamientos aplicados a conejos de engorda con peso y edad similares. Se alojaron en jaulas con buena ventilación y acceso continuo a alimento y agua. Los tratamientos incluyeron un testigo sin suero (T1) y tres niveles de inclusión del 10%, 20% y 30% de suero de leche en el agua (T2, T3 y T4). El suero se añadió fresco cada día. Durante 8 semanas se registraron consumos y peso. Al finalizar, se evaluó el rendimiento en canal y se analizaron los datos mediante ANOVA. Los resultados mostraron que el rendimiento en canal fue de 55.44% en el T1, 55.75% en el T2, 55.50% en el T3 y 57.47% en el T4, destacando este último como el más alto entre los tratamientos. Al evaluar por separado a machos y hembras, se identificó que las hembras alcanzaron un mejor rendimiento en canal, independientemente del nivel de suero utilizado. El aprovechamiento del suero de leche en la dieta de conejos de engorda representa una alternativa viable y sostenible para mejorar el rendimiento productivo sin incrementar costos.

Palabras Claves: Nutrición animal, subproductos agroindustriales, conversión alimenticia, crecimiento productivo, cunicultura.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de subproductos agroindustriales se ha vuelto cada vez más importante como una forma sostenible de apoyar la producción animal sin incrementar los costos (Muñoz *et al.* 2025; Ortega *et al.* 2025; Rodríguez y Castellanos, 2019). Esta práctica cobra especial valor hoy en día, cuando los productores buscan insumos accesibles, nutritivos y capaces de mejorar el desempeño de sus animales sin comprometer la rentabilidad. (El-Sabrout *et al*., 2023). Entre estos subproductos, el suero de leche sobresale por aportar proteínas de muy buena calidad y una variedad de aminoácidos esenciales (Uribe-Velázquez *et al*. 2025). Gracias a estas cualidades, se ha convertido en un ingrediente con gran potencial para apoyar el crecimiento y mejorar el desempeño productivo de distintas especies pecuarias (Kishawy *et al*., 2018).

En el caso de los conejos, diversos estudios han señalado que incorporar derivados lácteos en su alimentación puede influir positivamente en su crecimiento y en la eficiencia con la que aprovechan el alimento, e incluso, en algunos casos, mejorar ciertos aspectos de la calidad de la canal (Atallah *et al*., 202; Mijangos-Santos *et al.* 2022).

El uso de suero de leche en la alimentación de conejos no solo contribuye a mejorar su desempeño productivo, sino que también representa una estrategia sostenible al aprovechar un subproducto que, en muchos casos, se desperdicia. Investigaciones han demostrado que su inclusión en la dieta, ya sea en forma líquida o sólida, favorece la ganancia de peso, mejora la digestibilidad de los nutrientes

y aporta beneficios en la calidad de la carne, dependiendo de la cantidad utilizada y la forma de suministro (Kishawy *et al*., 2018).

El aprovechamiento del lactosuero se enmarca en prácticas de economía circular que buscan reducir el impacto ambiental de la industria láctea (Laz-Mero *et al.,* 2024; Giulianetti de Almeida *et al*., 2025). Incluso en otras especies, como los rumiantes y cerdos, se ha comprobado que el suero de leche puede ser una fuente proteica alternativa, contribuyendo a disminuir costos y a mitigar la contaminación ambiental (Yousefi *et al.,* 2022)."

Sin embargo, el impacto del suero de leche sobre el rendimiento en canal en conejos aún requiere mayor documentación, particularmente cuando se suministra mediante el agua de bebida. En este sentido, este estudio busca comprender cómo diferentes concentraciones de suero de leche añadidas al agua de bebida pueden influir en el rendimiento en canal de los conejos. La intención es identificar posibles mejoras productivas y evaluar si este subproducto puede integrarse de manera práctica, eficiente y económicamente viable en los sistemas de producción cunícola.

MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se desarrolló bajo un diseño experimental completamente al azar, utilizando cuatro tratamientos por cinco repeticiones, para conejos en etapa de engorda. Los animales seleccionados presentaban condiciones iniciales homogéneas, tanto en peso como en edad, con el fin de reducir la variabilidad y asegurar la comparabilidad entre los grupos. Los conejos fueron alojados en jaulas metálicas en una caseta con sistemas adecuados de ventilación y con acceso permanente a alimento y agua, garantizando condiciones óptimas de bienestar y manejo de acuerdo a la NOM-062-ZOO-1999 (SAGARPA, 1999).

Los tratamientos evaluados consistieron en: T1, testigo, con suministro de alimento comercial sin adición de suero de leche; T2, alimento comercial complementado con agua de bebida que contenía 10 % de suero de leche; T3, alimento comercial más agua de bebida con 20 % de suero de leche; y T4, alimento comercial acompañado de agua de bebida con 30 % de suero de leche.

Se empleó suero fresco de leche, obtenido de quesería de una comunidad rural cercana y se incorporó diariamente al agua de bebida para asegurar su adecuada calidad y evitar procesos de fermentación. Diariamente por la mañana se preparaba la mezcla correspondiente a cada tratamiento, homogenizándola antes de ofrecerla a los animales. El alimento se suministró *ad libitum* durante todo el periodo experimental.

El estudio tuvo una duración total de 8 semanas, midiendo el consumo de alimento y registrando el crecimiento para entender cómo el suero influía en la producción, se registraron las variables de consumo de alimento, consumo de agua y peso vivo semanal, lo que permitió calcular la ganancia de peso y estimar la eficiencia alimenticia.

Al finalizar el periodo, los conejos fueron sometidos al proceso de sacrificio conforme a las normas vigentes de bienestar animal de acuerdo a la NOM-033-SAG/ZOO-2014 (SAGARPA, 2015). Posteriormente, se obtuvo la canal caliente y se registraron los pesos correspondientes, con el fin de calcular el rendimiento en canal de cada individuo. De manera aleatoria, se registraron por separado los datos correspondientes a 20 hembras y 20 machos, con el fin de realizar una comparación del rendimiento en función del sexo.

Finalmente, los datos recopilados se analizaron mediante un ANOVA, con el propósito de determinar diferencias significativas entre tratamientos y evaluar el efecto de las distintas concentraciones de suero de leche.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El suero se añadió fresco cada día. Durante 8 semanas se registraron consumos y peso. Al finalizar, se evaluó el rendimiento en canal y se analizaron los datos mediante ANOVA. Los resultados mostraron que el rendimiento en canal fue de 55.44% en el T1, 55.75% en el T2, 55.50% en el T3 y 57.47% en el T4, destacando este último como el más alto entre los tratamientos. Al evaluar por separado a machos y hembras, se identificó que las hembras alcanzaron un mejor rendimiento en canal, independientemente del nivel de suero utilizado.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis estadístico ANOVA para los diferentes tratamientos. En relación con el peso vivo, se observaron diferencias significativas entre los grupos (p=0.035), destacando el tratamiento T2 con el mayor promedio (2.81 kg), mientras que T1 y T3 registraron valores de 2.72 kg y T4 el más bajo con 2.68 kg.

Tabla 1. Efecto de los tratamientos con suero de leche sobre el peso vivo, peso de la canal y rendimiento en canal de conejos.

Tratamientos	*Conejos*	*Promedio peso vivo (Kg)*	*Promedio peso de la canal (Kg)*	*Rendimiento en canal promedio*
T1	20	2.72±0.14^{b}	1.50±0.08^{a}	55.44±0.55^{a}
T2	20	2.81±0.13^{a}	1.57±0.06^{a}	55.91±0.65^{a}
T3	20	2.72±0.06^{b}	1.51±0.05^{a}	55.49±1.14^{a}
T4	20	2.68±.20b^{b}	1.54±0.12^{a}	57.47±4.33^{b}

Nota: Valores expresados como media ± desviación estándar.

En contraste, el análisis de varianza para el peso de la canal no mostró diferencias significativas entre los tratamientos (p=0.398). Aunque T2 presentó el promedio más alto (1.57 kg), seguido de T4 (1.54 kg), y T1 y T3 registraron valores ligeramente menores (1.51 kg), estas variaciones no fueron estadísticamente relevantes. Por otro lado, el rendimiento porcentual de la canal sí evidenció diferencias significativas (p=0.020), con el tratamiento T4 alcanzando el valor más elevado (57.47 %) frente a los demás grupos (55.44–55.91 %).

No obstante, la alta variabilidad observada en T4 sugiere que estos resultados deben interpretarse con cautela. En conjunto, los hallazgos indican que, bajo las condiciones del presente estudio, el tratamiento T2 se asocia con un mayor peso vivo, mientras que el tratamiento T4 muestra una ventaja en el rendimiento porcentual de la canal, aportando evidencia preliminar que podría orientar futuras investigaciones y estrategias de manejo productivo en conejos.

Se ha demostrado que la suplementación con suero de leche tiende a mejorar el peso vivo, ya que incrementa la eficiencia en el aprovechamiento de nutrientes (Pérez *et al.*, 2014). De acuerdo con Escobar-Salazar *et al.* (2025) la calidad de la dieta influye de manera importante en el rendimiento de la canal en conejos, destacando que dietas enriquecidas con proteínas lácteas pueden mejorar la proporción de carne deshuesada.

El análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor, mostrado en la Tabla 2, reveló que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre hembras y machos en el peso vivo ($F = 3.41$; $p = 0.073$). Aunque las hembras mostraron un promedio ligeramente mayor que los machos (2.79 kg frente a 2.70 kg), esta diferencia no superó el umbral de significancia ($\alpha = 0.05$). Sin embargo, el valor de p tan cercano al límite sugiere una tendencia interesante que podría confirmarse con más datos o una muestra mayor.

Tabla 2. Comparación del rendimiento entre hembras y machos (n = 20 por sexo)

Tratamientos	*Conejos*	*Promedio peso vivo (Kg)*	*Promedio peso de canal (Kg)*	*Promedio rendimiento en canal (%)*
H	20	2.79±0.15[a]	1.59±0.04[a]	57.31±2.9[a]
M	20	2.70±0.13[a]	1.49±0.09[b]	55.18±1.4[b]

Nota: Los datos corresponden a 20 hembras y 20 machos seleccionados aleatoriamente y analizados por separado para comparar el rendimiento según el sexo.

Por el contrario, en el peso de la canal se detectaron diferencias claras y significativas ($F = 17.24$; $p < 0.001$), con las hembras alcanzando un promedio superior (1.59 kg) comparado con los machos (1.49 kg). Esto demuestra que el sexo tuvo un impacto notable en este parámetro. De igual modo, el rendimiento porcentual de la canal presentó diferencias relevantes ($F = 7.84$; $p = 0.008$), favoreciendo a las hembras con 57.32% frente al 55.19% de los machos.

Estudios recientes han mostrado que el sexo puede afectar la velocidad de crecimiento de los animales, aunque este impacto no siempre resulta estadísticamente significativo debido a la variabilidad biológica natural (Ríos, 2024; Pascual y Cervera, 2023), por su parte Tosado, Lugo y Ramos (2019), confirman que el sexo es un factor determinante en el rendimiento de la canal y que las hembras tienden a presentar mayor peso de canal bajo condiciones de alimentación controlada.

El resultado sobre el rendimiento de la canal es altamente significativo, ya que refleja una mayor eficiencia en la conversión del peso vivo a peso de canal. Estudios recientes indican que factores como el sexo y la dieta modulan directamente este rendimiento porcentual, con las hembras mostrando mayor eficiencia en este aspecto (Ramírez y Méndez, 2010).

CONCLUSIÓN

Los tratamientos con suero de leche fresco mostraron efectos distintos en el rendimiento productivo de los conejos. En particular, los niveles moderados y altos de suero favorecieron una mejor eficiencia productiva, lo que coincide con estudios previos que destacan el buen aprovechamiento de los nutrientes provenientes de subproductos lácteos.

Por otro lado, las hembras presentaron un mayor rendimiento en canal en comparación con los machos, independientemente del tratamiento aplicado. Aunque el peso vivo solo mostró una tendencia sin diferencias estadísticamente significativas, estos resultados confirman que el sexo juega un papel clave en la conversión hacia masa muscular.

En conjunto, la suplementación diaria con suero de leche, sumada al mejor desempeño productivo de las hembras, representa una alternativa viable para optimizar la producción cunícola. Bajo condiciones controladas, fue posible alcanzar rendimientos en canal de hasta 57.47%. No obstante, la alta variabilidad observada en el tratamiento T4 sugiere la necesidad de estudios con un mayor tamaño de muestra para confirmar estos efectos. En este sentido, se recomienda priorizar el tratamiento T2 para mejorar el peso vivo y el T4 para maximizar la eficiencia en canal, fomentando así el uso de subproductos agroindustriales dentro de sistemas productivos más sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abdel-Fattah S, El-Sanhoury M, El-Mednay N, Abdel-Azeem F (2008) Thyroid activity, some blood constituents, organs morphology and performance of broiler chicks fed supplemental organic acids. Int J Poult Sci 7(3):215–222. https://link.springer.com/article/10.1186/s13568-018-0617-0

2. Atallah, A. A., Osman, A., Sitohy, M., Gemiel, D. G., El-Garhy, O. H., Azab, I. H. E., Fahim, N. H., Abdelmoniem, A. M., Mehana, A. E., & Imbabi, T. A. (2021). Physiological Performance of Rabbits Administered Buffalo Milk Yogurts Enriched with Whey Protein Concentrate, Calcium Caseinate or Spirulina platensis. Foods, 10(10), 2493. https://doi.org/10.3390/foods10102493
3. Giulianetti de Almeida, M. P., Mockaitis, G., & Weissbrodt, D. G. (2025). Got Whey? Sustainability endpoints for the dairy industry through resource biorecovery. Fermentation, 9(10), 897. https://doi.org/10.3390/fermentation9100897
4. El-Sabrout, K., Khalifah, A., & Ciani, F. (2023). Current Applications and Trends in Rabbit Nutraceuticals. Agriculture, 13(7), 1424. https://doi.org/10.3390/agriculture13071424
5. Kishawy, A. T. Y., Amer, S. A., Osman, A., Elsayed, S. A. M., Abd El-Hack, M. E., Swelum, A. A., Ba-Awadh, H., & Saadeldin, I. M. (2018). Impacts of supplementing growing rabbit diets with whey powder and citric acid on growth performance, nutrient digestibility, meat and bone analysis, and gut health. AMB Express, 8(86), 1–10. https://doi.org/10.1186/s13568-018-0617-0
6. Laz-Mero, M., Tuárez-Párraga, M. A., Córdova-Mosquera, A., Panchana-Cedeño, R., Solorzano Zambrano, L., Gavilanes-López, P., & Cedeño-Carpio, X. (2024). Aprovechamiento sostenible del lactosuero: oportunidades y desafíos para la economía circular. AgEcon Search. https://doi.org/10.22004/AG.ECON.386133
7. Mijangos-Santos, N. A., Villegas-Aparicio, Y., Gómez-Vázquez, A., Hernández-Bautista, J., Govea-Luciano, A., Montañez-Valdez, O. D., & Rubio-Arias, H. O. (2022). Meat production and quality of rabbits fed different diets and a biological activator. *Agro Productividad,* 15(7), 159–165. https://doi.org/10.32854/agrop.v15i7.2341
8. Muñoz, J. P., Cobeña, C. J., Vera, C. J., & Álava, J. A. (2025). Gestión integral de subproductos agropecuarios: oportunidades para el desarrollo de productos agroalimentarios innovadores. *Punto Ciencia*, 6(2), 1–15. https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i2.736
9. Ortega-González, L., Ayala-Martínez, M., González-Tenorio, R., Nava-Morales, G. M., Hernández-Domínguez, H., & Soto-Simental, S. (2025). Uso de la yaca (Artocarpus heterophyllus Lam.) como residuo agroindustrial en la alimentación animal: Revisión sistemática. Agronomía Mesoamericana, 36, e60851. https://doi.org/10.15517/am.2025.60851
10. Pascual, M., & Cervera, C. (2023). Influencia de la densidad de población y el sexo en el engorde de los conejos. *Entorno Pecuario*. https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/influencia-de-la-densidad-de-poblacion-y-el-sexo-en-el-engorde-de-los-conejos/
11. Pérez Sánchez, R. E., López Rodríguez, M., Bautista Guzmán, E. C., García Valladares, A., Román Bravo, R. M., & Ortiz Rodríguez, R. (2014). Efecto del suero de leche como complemento de la dieta sobre el crecimiento de las vellosidades intestinales y el peso de lechones en la etapa de 6 a 20 kg. *Revista Científica*, 24(4), 319–324. https://www.redalyc.org/pdf/959/95931404009.pdf
12. Ramírez, J. A., & Méndez, R. (2010). Effect of breed and sex on rabbit carcass yield and meat quality. *World Rabbit Science, 18*(3), 145-152. https://polipapers.upv.es/index.php/wrs/article/view/445
13. Ríos Avilés, L. A. (2024). Eficiencia alimenticia de conejos hembras y machos finalizados con alimentos balanceados comerciales [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México. https://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/141611/Tesis%20Final.%20Luis%20Alberto%20Ri%CC%81os%20Avile%CC%81s%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y
14. Rodríguez-Hernández, G., & Castellanos-Ramos, J. (2019). Variables productivas y digestibilidad en conejos alimentados con subproductos agroindustriales. *Abánico Veterinario*, 6(1), 110-120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662023000100110
15. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO-2014, métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx
16. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (1999). *Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx

17. Tosado-Martínez, J. A., Lugo-Figueroa, E. F., & Ramos-Trujillo, L. S. (2019). Rendimiento comparativo de componentes de la canal de conejos con diferente influencia genética paterna. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 103(1), 49-58. https://revistas.upr.edu/index.php/jaupr/article/view/19635
18. Uribe-Velázquez, T.; Díaz-Vázquez, D.; Barajas-Álvarez, P.; González-López, M.E.; Gradilla-Hernández, M.S.; Garcia-Amezquita, L.E.; García-Cayuela, T. From waste to value: Mitigating the environmental impact of whey in Jalisco, Mexico. *J. Clean. Prod*. 2025, 501, 145334. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145334
19. Yousefi, R., Taghizadeh, A., Paya, H., Hossein-Khani, A., Palangi, V., Abachi, S., Shirmohammadi, S., & Besharati, M. (2022). Usability of whey powder as an alternative protein source in ruminant nutrition. Clean Technologies and Environmental Policy, 24(7), 2967–2974. https://doi.org/10.1007/s10098-022-02345-7

EFECTO DE NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MULTIPLE SOBRE LA DINÁMICA DE IMBIBICIÓN Y GERMINANCIÓN DE *Zea Mays L.*: ESTABLECIENDO UNA BASE BIOFISICOQUÍMICA

Zaida Irazú Téllez Pérez[1], Elizabeth Vega Moreno[2], Jorge Luis Rodríguez Alejandre[3], Nabanita Dasgupta Schubert[2]

[1]Facultad de Qímico Farmacobiología, UMSNH, [2]Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH, [3]Instituto Tecnológico de Morelia.

Nabanita.schubert@umich.mx

RESUMEN

La imbibición constituye la fase inicial y crítica del proceso germinativo en *Zea mays* L., caracterizada por la rápida absorción de agua y la reactivación metabólica del embrión. En este contexto, los nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) han emergido como nanomateriales con potencial para modular el transporte hídrico y el estado redox, debido a su elevada área superficial y capacidad de adsorción.

El objetivo de este trabajo es establecer una línea base experimental para evaluar el efecto de NTCPM sobre la imbibición y germinación en semillas de maíz de la variedad “Salamandra”. Se analizaron parámetros fisiológicos en un sistema control, incluyendo cinética de absorción de agua, porcentaje de imbibición y germinación, biomasa, contenido de clorofila y perfil ionómico mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF).

Los resultados evidenciaron un incremento de masa de 25.5 ± 7.6 % en 24 h, característico de la fase inicial de imbibición dominada por gradientes de potencial hídrico. El porcentaje de germinación (93.3 %), confirmó la viabilidad del sistema experimental. El contenido de clorofila presentó valores de 160 ± 0.11 $mg \cdot m^{-3}$ (clorofila a) y 58.78 ± 0.09 $mg \cdot m^{-3}$ (clorofila b), reflejando un aparato fotosintético funcional. El análisis ionómico, reveló una acumulación preferencial de K (150.15 mg/L) y P (90.18 mg/L) en plántulas, elementos clave para la regulación osmótica y metabolismo energético, lo que confirma un estado fisiológico activo y no estresado.

En conjunto, estos resultados establecen una base biofísicoquímica robusta que permitirá evaluar el papel de los NTCPM como moduladores del transporte de agua, nutrientes y equilibrio redox durante las etapas tempranas del desarrollo vegetal.

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna enfrenta desafíos asociados al cambio climático, la degradación de los recursos naturales y la creciente demanda alimentaria mundial. Bajo este escenario, resulta necesario desarrollar estrategias innovadoras que permitan optimizar la productividad agrícola sin incrementar significativamente el impacto ambiental. Entre los cultivos de mayor importancia económica y alimentaria destaca *Zea mays* L., especie considerada un organismo modelo para estudios fisiológicos, genéticos y agronómicos debido a su relevancia global y amplia adaptabilidad (Strable & Scanlon, 2010).

La germinación constituye una de las etapas más críticas del ciclo de vida vegetal, ya que determina el establecimiento inicial de las plántulas y condiciona el desarrollo posterior del cultivo. Este proceso inicia con la imbibición, fenómeno fisicoquímico mediante el cual la semilla absorbe agua desde el medio circundante debido a gradientes de potencial hídrico entre los tejidos deshidratados y el ambiente externo. La entrada de agua desencadena la rehidratación celular, la reorganización

estructural de membranas, la activación enzimática y la movilización de reservas metabólicas indispensables para el crecimiento embrionario (Bradford, 1990).

En años recientes, la nanotecnología ha adquirido relevancia en el ámbito agrícola debido a la posibilidad de emplear nanomateriales como herramientas para mejorar procesos fisiológicos vegetales. Entre estos materiales destacan los nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM), estructuras cilíndricas formadas por capas concéntricas de grafeno que presentan elevada área superficial, alta conductividad eléctrica, resistencia mecánica y capacidad de interacción con biomoléculas (Tripathi et al., 2019).

Dentro de este contexto, el interés por estudiar los NTCPM en sistemas vegetales se fundamenta en tres características fisicoquímicas que podrían influir directamente sobre los procesos asociados a la imbibición y al desarrollo temprano de las plantas.

En primer lugar, los NTCPM presentan propiedades estructurales que favorecen el transporte de agua y especies iónicas. Estos nanomateriales poseen una superficie de grafeno lisa, prácticamente libre de fricción, que permite una elevada movilidad de moléculas a través de su estructura. Además, exhiben una resistencia mecánica excepcional y una alta conductividad térmica y eléctrica, comportándose como conductores o semiconductores dependiendo de su estructura específica. Los NTCPM prístinos son inherentemente hidrofóbicos y no polares, por lo que son insolubles en agua; sin embargo, su arquitectura nanométrica les confiere propiedades de transporte que podrían modificar la dinámica de absorción de agua y nutrientes en tejidos vegetales (Tiwari et al., 2014; Tripathi et al., 2019). En segundo lugar, diversos estudios han demostrado que los NTCPM pueden interactuar con estructuras biológicas vegetales debido a su tamaño nanométrico y elevada relación longitud-diámetro. Estas características favorecen su interacción con cubiertas seminales, paredes celulares y membranas biológicas, lo que potencialmente podría alterar procesos asociados a la permeabilidad celular, el transporte de agua y la distribución de nutrientes minerales durante la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas (Lahiani et al., 2013; Tiwari et al., 2014).

Finalmente, los NTCPM poseen una extraordinaria capacidad de adsorción derivada de su elevada área superficial, estructura hueca y naturaleza electrónica. La adsorción puede ocurrir mediante fuerzas de Van der Waals, interacciones con electrones π deslocalizados y formación de enlaces de hidrógeno. Esta propiedad resulta particularmente relevante desde una perspectiva fisiológica, ya que especies reactivas de oxígeno (EROs) generadas bajo condiciones de estrés podrían ser adsorbidas o secuestradas por los nanotubos, disminuyendo potencialmente el daño oxidativo y contribuyendo al mantenimiento del equilibrio redox celular. Dado que las EROs desempeñan funciones fundamentales durante la germinación y la señalización fisiológica temprana, la interacción NTCPM–ERO podría representar un mecanismo importante en la regulación del desarrollo vegetal (Wang et al., 2023; Tripathi et al., 2019).

Estas propiedades convierten a los NTCPM en candidatos particularmente atractivos para aplicaciones de nanoagricultura, ya que podrían influir simultáneamente sobre procesos de transporte hídrico, nutrición mineral y regulación redox, factores estrechamente relacionados con el establecimiento y vigor inicial de las plántulas.

Diversas investigaciones han documentado efectos positivos de los NTCPM sobre parámetros fisiológicos vegetales. En maíz, se ha observado un incremento en la absorción de agua y nutrientes, así como mejoras en el crecimiento y desarrollo temprano (Tiwari et al., 2014). De manera similar, estudios realizados en arroz reportaron modificaciones anatómicas y fisiológicas asociadas con una mayor productividad tras la exposición a nanotubos de carbono (Joshi et al., 2020). No obstante, también existen evidencias que indican respuestas dependientes de la concentración, tamaño y funcionalización de los nanotubos, pudiendo incluso presentarse efectos fitotóxicos bajo determinadas condiciones experimentales (Hatami, 2017).

A pesar del creciente interés por la nanoagricultura, los mecanismos mediante los cuales los NTCPM interactúan con las semillas durante las primeras etapas de la germinación permanecen insuficientemente comprendidos. Particularmente, existe escasa información sobre su posible influencia en la dinámica de imbibición, la absorción de nutrientes minerales y los procesos asociados al equilibrio redox en *Zea mays* L. Asimismo, la mayoría de los estudios disponibles se han enfocado en evaluar respuestas morfológicas o fisiológicas posteriores a la germinación, mientras que los eventos biofisicoquímicos tempranos que ocurren durante la absorción inicial de agua continúan siendo poco explorados.

En este contexto, resulta indispensable establecer una línea base biofisicoquímica que permita caracterizar el comportamiento fisiológico normal de las semillas bajo condiciones controladas. Esta línea base constituye una referencia experimental necesaria para identificar y cuantificar posteriormente los posibles cambios inducidos por la exposición a nanotubos de carbono de pared múltiple, contribuyendo así a una mejor comprensión de los mecanismos que gobiernan la interacción entre nanomateriales y sistemas vegetales durante las etapas tempranas del desarrollo.

OBJETIVO

Establecer una línea base biofisicoquímica de referencia para la evaluación de los efectos de nanotubos de carbono de pared múltiple sobre la dinámica de imbibición y germinación de semillas de Zea mays L.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material biológico

Se utilizaron semillas de *Zea mays* L. variedad Salamandra, seleccionadas visualmente para garantizar uniformidad de tamaño, ausencia de daño mecánico y viabilidad aparente.

Ensayo de imbibición

Las semillas de *Zea mays* L. variedad Salamandra fueron sometidas a imbibición durante 24 h bajo condiciones controladas. Se utilizaron 30 semillas distribuidas en seis cajas Petri, cada una con cinco semillas, considerándose cada caja como una repetición biológica (n = 30). La absorción de agua se determinó mediante mediciones gravimétricas utilizando una balanza analítica OHAUS. El porcentaje de absorción se calculó a partir de la diferencia entre el peso inicial y el peso final registrado después del periodo de hidratación. Los resultados fueron expresados como promedio ± desviación estándar.

Evaluación de germinación

Posteriormente, las 30 semillas imbibidas fueron cultivadas en frascos Magenta que contenían agar bacteriológico BD Bioxon al 0.2 % (pH 5.8). Las plántulas se mantuvieron en una cámara de crecimiento bajo condiciones controladas de temperatura (20–25 °C), fotoperiodo de 16 h luz y 8 h oscuridad, humedad relativa inferior al 40 % e intensidad lumínica aproximada de 1800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. El porcentaje de germinación se determinó mediante la observación de la protrusión visible de la radícula. De las 30 semillas evaluadas, 28 presentaron germinación exitosa, correspondiendo a un porcentaje de germinación de 93.3 %.

Determinación de clorofila

El contenido de clorofila se determinó mediante el método espectrofotométrico descrito por Hansmann (1973). Para ello, se seleccionaron cuatro plántulas de *Zea mays* L. de 14 días de desarrollo. La parte aérea de cada plántula fue macerada utilizando 10 mL de acetona al 90 % (v/v) como solvente de extracción. Los extractos obtenidos se mantuvieron durante 24 h a 4 °C en oscuridad para favorecer la extracción completa de los pigmentos fotosintéticos.

Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas a 2500 rpm durante 5 min y el sobrenadante se utilizó para las determinaciones espectrofotométricas. La absorbancia se midió a 665, 645 y 630 nm empleando acetona al 90 % como blanco. A partir de estos valores se calcularon las concentraciones

de clorofila a y clorofila b. Los resultados fueron expresados como promedio ± desviación estándar de cuatro réplicas biológicas (n = 4).

Análisis ionómico

La composición elemental de las plántulas se determinó mediante fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF). Para ello, se seleccionaron cuatro plántulas de *Zea mays* L. de la misma edad y estado fisiológico (n = 4). El análisis se realizó utilizando un espectrómetro S2 PICOFOX® (Bruker Nano GmbH, Alemania), equipado con un tubo de rayos X de molibdeno y geometría de reflexión total.

Las muestras fueron preparadas a partir de tejido vegetal completo (raíz y parte aérea), empleando galio como estándar interno para la cuantificación elemental. Los espectros obtenidos fueron procesados mediante el software del equipo para determinar las concentraciones de los elementos presentes en las muestras vegetales. Los resultados se expresaron en mg/L como promedio ± desviación estándar de cuatro réplicas biológicas.

Análisis estadístico

Los resultados fueron expresados como promedio ± desviación estándar. El procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante el software estadístico JMP® Pro v.13 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Los datos obtenidos fueron empleados para establecer parámetros de referencia fisiológica para futuras evaluaciones experimentales con NTCPM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de imbibición

Las semillas presentaron un incremento de masa de 25.5 ± 7.6 % después de 24h de imbibición. Este comportamiento es consistente con la fase inicial de absorción rápida de agua descrita para semillas ortodoxas, donde predominan gradientes de potencial hídrico y fuerzas matriciales responsables de la hidratación de los tejidos seminales.

La adecuada absorción observada indica que las semillas empleadas conservan integridad estructural y funcionalidad fisiológica, constituyendo una condición indispensable para posteriores estudios de interacción con NTCPM.

Germinación

El porcentaje de germinación alcanzó 93.3%, valor que evidencia una elevada viabilidad fisiológica del material vegetal. Este resultado confirma que las condiciones experimentales utilizadas fueron adecuadas para promover el establecimiento exitoso de plántulas y minimizar la posibilidad de efectos asociados a estrés ambiental o deterioro de la semilla.

Contenido de clorofila

Las concentraciones de clorofila a y clorofila b fueron de 160± 0.11 $mg \cdot m^{-3}$ y 58.78 ± 0.09 $mg \cdot m^{-3}$, respectivamente. Estos resultados indican el desarrollo de un aparato fotosintético funcional y sugieren que las plántulas alcanzaron un estado fisiológico compatible con un crecimiento normal.

La predominancia de clorofila a respecto a clorofila b coincide con lo reportado para tejidos fotosintéticos activos y refleja una adecuada capacidad para la captura y conversión de energía luminosa.

Perfil ionómico

El análisis mediante TXRF reveló concentraciones elevadas de potasio y fósforo, alcanzando valores de 150.15 mg/L y 90.18 mg/L, respectivamente.

El potasio participa activamente en la regulación osmótica, mantenimiento del potencial hídrico celular y activación enzimática, mientras que el fósforo desempeña funciones fundamentales en transferencia energética, síntesis de ATP y metabolismo de ácidos nucleicos.

La acumulación de ambos elementos sugiere un estado metabólico activo y fisiológicamente estable durante las etapas tempranas del desarrollo vegetal.

Relevancia para estudios con NTCPM

Los parámetros obtenidos constituyen una referencia experimental indispensable para futuras evaluaciones del efecto de NTCPM. Cualquier modificación en la absorción de agua, germinación, contenido fotosintético o perfil elemental podrá ser comparada contra esta línea base para determinar si los NTCPM inducen cambios fisiológicos significativos.

CONCLUSIONES

Se estableció una línea base biofisicoquímica robusta para semillas de *Zea mays L*. de la variedad Salamandra bajo condiciones controladas de imbibición y germinación.

Las semillas presentaron elevada viabilidad fisiológica, adecuada absorción de agua, desarrollo fotosintético funcional y un perfil elemental compatible con un metabolismo activo.

Los resultados obtenidos proporcionan parámetros de referencia que permitirán evaluar de manera objetiva los posibles efectos de los nanotubos de carbono de pared múltiple sobre el transporte hídrico, la absorción mineral y el equilibrio redox durante las etapas tempranas del desarrollo vegetal.

Asimismo, este trabajo constituye el punto de partida para el desarrollo de estrategias de nanoagricultura al mejoramiento fisiológico de cultivos de importancia alimentaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Tiwari, D. K., Dasgupta-Schubert, N., Villaseñor Cendejas, L. M., Villegas, J., Carreto Montoya, L., & Borjas García, S. E. (2014). *Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: Enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (Zea mays) and implications for nanoagriculture*. Applied Nanoscience, 4, 577–591. https://doi.org/10.1007/s13204-013-0236-7
2. Lahiani, M. H., Dervishi, E., Chen, J., Nima, Z., Gaume, A., Biris, A. S., & Khodakovskaya, M. V. (2013). *Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops*. ACS Applied Materials & Interfaces, 5(16), 7965–7973. https://doi.org/10.1021/am402052x
3. Joshi, A., Sharma, L., Kaur, S., Dharamvir, K., Nayyar, H., & Verma, G. (2020). *Plant nanobionic effect of multi-walled carbon nanotubes on growth, anatomy, yield and grain composition of rice*. BioNanoScience, 10, 430–445. https://doi.org/10.1007/s12668-020-00725-1
4. Tripathi, D. K., Shweta., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2019). *Applications of carbon nanomaterials in the plant system: A perspective view on the pros and cons*. Science of the Total Environment, 667, 485–499. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.409
5. Wang, X., Han, H., Liu, R., Chen, J., & Luo, Y. (2023). *Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize*. Plants, 12(8), 1604. https://doi.org/10.3390/plants12081604
6. Hatami, M. (2017). *Toxicity assessment of multi-walled carbon nanotubes on Cucurbita pepo L. under well-watered and water-stressed conditions*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 142, 274–283. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.04.018
7. *Bradford, K. J. (1990).* A water relations analysis of seed germination rates*. Plant Physiology, 94(2), 840–849. https://doi.org/10.1104/pp.94.2.840*
8. *Strable, J., & Scanlon, M. J. (2010).* Maize (Zea mays): A model organism for basic and applied research in plant biology*. Cold Spring Harbor Protocols, 2010(10), pdb.emo132. https://doi.org/10.1101/pdb.emo132*

PROPIEDADES TECNOLÓGICAS EN HARINAS DE CEREALES, LEGUMINOSAS Y TUBÉRCULOS

Nelly del Socorro Cruz-Cansino, Quinatzin Yadira Zafra-Rojas, Alejandro Quezada-Alvarez, Angélica Rubí Reyes-Castillo, Esther Ramírez-Moreno, Zuli Calderón-Ramos, Trinidad Lorena Fernández-Cortés

Centro de Investigación Interdisciplinaria, Área Académica de Nutrición, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

ncruz@uaeh.edu.mx

RESUMEN

A partir de los cereales, leguminosas y tubérculos se obtienen subproductos como la harina, que es usada para la formulación de galletas, pastas, pan, etc. Las características de estas harinas dependen de sus propiedades tecnológicas (entre ellas la solubilidad, la capacidad emulsificante, viscosidad y gelificación). Se ha reportado que las leguminosas demuestran mejor solubilidad para mezclarse con otras matrices alimentarias, mientras que los tubérculos elevada capacidad de gelificación, la cual se relaciona con su contenido en almidón. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades tecnológicas de harinas de cereales (arroz, avena y amaranto), leguminosa (garbanzo) y tubérculos (tapioca y yuca), mediante las determinaciones de solubilidad, capacidad emulsificante, viscosidad y capacidad de gelificación. Dentro de la metodología, las 6 harinas fueron adquiridas en una tienda local de Pachuca, Hidalgo, México y la prueba de solubilidad fue por Cano-Chauca y cols. La capacidad emulsificante (CE) fue de acuerdo a García y cols. Para viscosidad se desarrolló como Szymańskay cols. y la capacidad de gelificación (CG) según Damak y cols. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) con una prueba de Duncan con nivel de significancia de $p<0.05$. Los resultados evidenciaron que las harinas estuvieron entre 20.95 y 21.71% de solubilidad, siendo la harina de garbanzo la de mayor porcentaje (21.71%) ($p<0.05$). Para CE se reportó entre 5 y 6.65% y al igual que en los resultados anteriores, la harina de garbanzo fue la más alta. La viscosidad osciló entre 0.00 y 974 cP y la harina de amaranto tuvo la mayor viscosidad ($p<0.05$). Finalmente, la harina de tapioca mostró CG a una concentración de 10%, mientras que la harina de yuca requirió una concentración mayor (20%). Como conclusión se tiene que la harina de garbanzo muestra mayor potencial tecnológico. Por lo tanto, el conocer previamente estas las propiedades ayudarán en el uso y comportamiento al momento de incluirla como materia prima en la elaboración de diversos productos.

INTRODUCCIÓN

Los cereales, las leguminosas y los tubérculos constituyen una fuente importante de alimentos de origen vegetal debido a su aporte de proteínas, fibra dietética y carbohidratos[1]. De estas materias primas se elaboran diversos subproductos, entre los que destacan las harinas, ampliamente utilizadas en la formulación de alimentos como pan, galletas y pastas[2]. Los atributos de estas harinas están determinados por sus propiedades tecnológicas, las cuales varían según la especie vegetal de origen. En cereales como el amaranto, la avena, el trigo y la quinoa se han reportado elevadas capacidades de hinchamiento y retención de agua[3], mientras que las harinas obtenidas de leguminosas como garbanzo, haba, lenteja y frijol presentan una mayor solubilidad, favoreciendo su incorporación en diferentes matrices alimentarias[4]. Por su parte, los tubérculos, entre ellos la tapioca, la papa y el camote, se distinguen por su alta capacidad de gelificación, atribuida principalmente a su contenido de almidón[5]. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades tecnológicas de harinas obtenidas de cereales (arroz, avena y amaranto), una leguminosa (garbanzo) y tubérculos (tapioca y yuca), mediante la determinación de parámetros como solubilidad, capacidad emulsificante, viscosidad y capacidad de gelificación.

PARTE EXPERIMENTAL

Determinación de solubilidad

La determinación de la solubilidad de las harinas se realizó mediante un método gravimétrico, con la finalidad de evaluar la proporción de compuestos capaces de dispersarse y mantenerse en solución acuosa. Para ello, se pesaron con precisión 5 g de muestra y se colocaron en un vaso de precipitado, al que posteriormente se añadieron 50 mL de agua destilada. La mezcla se sometió a agitación constante durante 5 minutos utilizando una parrilla con sistema de agitación magnética. Una vez concluido este proceso, la suspensión se centrifugó a 3000 rpm durante 5 minutos empleando una centrífuga (Hamilton Bell, Nueva Jersey, EE. UU.). Posteriormente, se tomaron 5 mL del sobrenadante y se colocaron en una cápsula de pesaje previamente pesada. Las muestras se secaron en un horno (Scorpion Scientific, A-052055, México) a 105 °C durante 5 horas para eliminar completamente el agua. Finalmente, se registró el peso de los sólidos remanentes y el porcentaje de solubilidad se calculó mediante la siguiente ecuación[6]:

$$\text{Solubilidad (\%)} = (\text{Peso del sobrenadante seco (g)}/\text{Peso de la muestra (g)})*100$$

Capacidad emulsificante

La capacidad emulsificante (CE) de las muestras se determinó con el fin de evaluar su habilidad para formar y estabilizar emulsiones entre fases acuosas y oleosas. Para ello, se pesó 1 g de harina y se transfirió a un recipiente aforado, donde se adicionó agua destilada hasta completar un volumen de 25 mL. La suspensión obtenida se agitó durante 15 minutos para favorecer la hidratación y dispersión de los componentes de la muestra. Posteriormente, se incorporaron 25 mL de aceite y la mezcla se homogeneizó durante 5 minutos. Una vez concluida la agitación, la muestra se centrifugó (Allegra 25R, EE. UU.) a 1300 rpm durante 10 minutos. Finalmente, se retiró la fase no emulsificada y se cuantificó el volumen de la capa emulsificante[7] utilizando una probeta graduada. Los resultados se expresaron en porcentaje utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CE (\%)} = \text{altura de la capa emulsificadora (cm)}/\text{contenido del tubo (g)} * 100$$

Viscosidad

La viscosidad de las muestras se determinó a partir de una dispersión preparada al 10% (p/v). La medición se realizó utilizando un viscosímetro (Brookfield, DVT3, EUA), equipado con la aguja número 63. Las lecturas se efectuaron a una velocidad constante de 30 rpm y a temperatura ambiente

Capacidad de gelificación (CG)

La capacidad de gelificación (CG) de las harinas se evaluó mediante la preparación de suspensiones acuosas con concentraciones de 2, 5, 10 y 20% (p/v), utilizando 5 mL de agua destilada en tubos de ensayo. Posteriormente, las muestras se sometieron a calentamiento en un baño de agua a 100 °C durante 1 hora. Una vez finalizado el tratamiento térmico, los tubos se enfriaron en un baño de agua y se mantuvieron en reposo durante 2 horas. La concentración mínima de gelificación se determinó mediante inspección visual, identificando el menor porcentaje de harina capaz de formar un gel estable, evidenciado por la ausencia de flujo o desprendimiento del contenido al invertir el tubo[8] .

RESULTADOS

En la Figura 1 se pudo observar que la harina con mayor solubilidad ($p<0.05$) fue la de garbanzo con 21.71% a diferencia de la harina de arroz (20.95%). El porcentaje de solubilidad fue ligeramente menor a lo registrado por Solanke et al.[4], mientras que otros estudios han reportado solubilidad en avena, garbanzo y yuca en rangos variables[4,9]. Los datos elevados en la harina de garbanzo pueden atribuirse a su mayor contenido de moléculas solubles[9].

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 1, la harina de garbanzo presentó el mayor porcentaje de solubilidad ($p<0.05$), alcanzando un valor de 21.71%, seguida por la harina de arroz con 20.95%. Los valores obtenidos fueron ligeramente inferiores a los reportados por Solanke et al.[4].

Asimismo, investigaciones previas han documentado niveles de solubilidad variables en harinas de avena, garbanzo y yuca, lo que refleja la influencia de factores como la composición química, el procesamiento y el origen de la materia prima[4,9]. La elevada solubilidad observada en la harina de garbanzo podría estar asociada a su mayor contenido de compuestos solubles, como proteínas y carbohidratos de bajo peso molecular, los cuales favorecen su dispersión en medios acuosos[9].

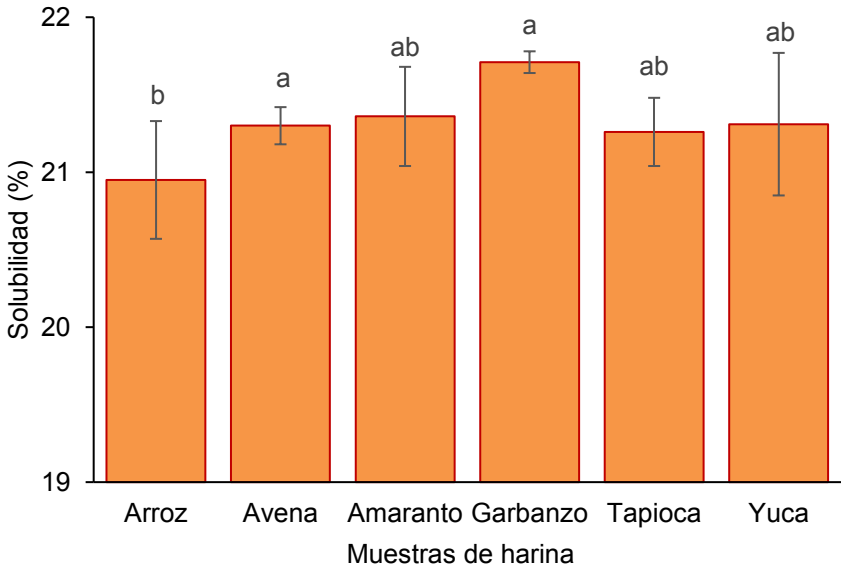


Figura 1. Solubilidad en diferentes harinas. [a-b] Letras diferentes indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre las muestras.

La capacidad emulsificante (CE) de las harinas evaluadas presentó valores comprendidos entre 5 y 6.65%, observándose que la harina de garbanzo registró el valor más elevado (Tabla 1). Este comportamiento coincide con lo reportado por Badia et al.[3], quienes encontraron capacidades emulsificantes de 0.5, 3.3 y 51.4% para harinas de avena, amaranto y garbanzo, respectivamente. De manera similar, otros estudios han informado valores elevados de CE en harina de yuca[10]. La superior capacidad emulsificante observada en la harina de garbanzo puede estar relacionada con su composición proteica, particularmente con la presencia de globulinas. Estas proteínas poseen regiones hidrofóbicas e hidrofílicas que favorecen la interacción simultánea con agua y aceite, contribuyendo a la formación y estabilización de emulsiones en sistemas alimentarios[3].

Tabla 1. Capacidad emulsificante, viscosidad y capacidad de gelificación de diferentes harinas

Determinación	Arroz	Avena	Amaranto	Garbanzo	Tapioca	Yuca
CE (%)	6.41 ± 0.00^{c}	5.00 ± 0.00^{e}	6.45 ± 0.00^{b}	6.65 ± 0.02^{a}	6.28 ± 0.00^{d}	5.00 ± 0.00^{e}
Viscosidad (cP)	0.00 ± 0.00^{d}	7.8 ± 0.28^{c}	974 ± 2.00^{a}	8.00 ± 0.00^{c}	0.00 ± 0.00^{d}	45.66 ± 2.08^{b}
CG (%)	0	0	0	0	10	20

[a-e] Letras diferentes indican diferencia significativa ($p<0.05$) entre las muestras. CE; capacidad emulsificante; cP: centipoises; CG: capacidad de gelificación.

Los valores de viscosidad obtenidos para las harinas evaluadas variaron entre 0.00 y 974 cP, siendo la harina de amaranto la que presentó la viscosidad significativamente más alta ($p<0.05$) (Tabla 1). Estos resultados concuerdan con los reportados por Grewal[11], quien registró una viscosidad de 943 cP para harina de amaranto. En contraste, Kaur et al[12]. observaron valores superiores en harina de

arroz. Las diferencias encontradas entre estudios podrían estar relacionadas con factores como el origen de la materia prima, la composición química de las harinas y los tratamientos térmicos aplicados antes de la evaluación. La alta viscosidad de la harina de amaranto se atribuye principalmente a las características de su almidón, cuyos gránulos pequeños, elevado contenido de amilopectina y capacidad de gelatinización favorecen una mayor resistencia al flujo[11].

En cuanto a la capacidad de gelificación (CG), la harina de tapioca formó un gel estable a una concentración mínima de 10%, mientras que la harina de yuca requirió una concentración de 20% para alcanzar el mismo comportamiento (Tabla 1). Los resultados obtenidos para la harina de tapioca son consistentes con los reportados por Hongviangjan et al.[13]. Sin embargo, Oppong et al.[14] encontraron valores diferentes para harinas de arroz y yuca, lo que podría atribuirse a variaciones en la composición química y las condiciones de procesamiento. La capacidad de gelificación observada en las muestras evaluadas podría estar relacionada con su contenido de amilosa, componente clave en la formación y estabilidad de los geles.

CONCLUSIONES

La harina de garbanzo presentó el mayor potencial tecnológico entre las muestras analizadas, destacando por sus propiedades funcionales y su versatilidad de aplicación. El conocimiento de estas características permite predecir su comportamiento durante las diferentes etapas de procesamiento, optimizar su incorporación en formulaciones alimentarias y favorecer su selección como materia prima para el desarrollo de productos con adecuada calidad, estabilidad, valor nutricional y aceptación por parte de los consumidores.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Maray, “Physicochemical and functional properties, nutritional value and bioactive compounds of some composite flours”, Assiut J Agric Sci., Vol. 54, 1, 2023, pp. 116-131.
2. J. Li, A. Yeh, “Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches”, J Food Eng., Vol. 50, 3, 2001, pp. 141-148.
3. C. Badia, L. Laguna, C. Haros, A. Tárrega, “Techno-functional and rheological properties of alternative plant-based flours”, Foods. Vol. 12, no 7, 2023, pp. 1411.
4. N. Solanke, J. Ughade, “Study of the physical and functional properties of chickpea and black gram flours”, Int J Curr Microbiol Appl Sci., Vol. 10, 2021, pp. 277-282.
5. N. Techeira, L. Sívoli, B. Perdomo, A. Ramírez, F. Sosa, “Physicochemical, functional and nutritional characterization of raw flours obtained from different varieties of cassava (*Manihot esculenta Crantz*), sweet potato (*Ipomoea batatas Lam*) and yam (*Dioscorea alata*) grown in Venezuela”, Interciencia., Vol. 39, No. 3, 2014, pp. 191-197.
6. M. Cano-Chauca y cols., “Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization”, Innov. Food Sci. Emerg. Technol., Vol. 6, 4, 2005, pp. 420-428.
7. O. García, y cols. “Caracterización físico-química y propiedades funcionales de la harina obtenida de granos de quinchoncho (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) sometidos a diferentes procesamientos”, Rev. Cient. UDO Agríc., Vol. 12, 4, 2012, pp. 919–928.
8. A.M.A. Damak, y cols., “Functional and nutritional properties of various flour blends of arrowroot starch and wheat flour”, Asian Food Sci. J., Vol. 21, 6, 2022, pp. 12–25
9. S. Du, H. Jiang, X. Yu, J. Jane, “Physicochemical and functional properties of whole legume flour”, LWT Food Sci Technol., Vol. 55, 1, 2013; pp. 308-313.
10. M. Hasmadi, L. Harlina, L. Jau-Shya, A. Mansoor, M. Jahurul, M. Zainol. “Physicochemical and functional properties of cassava flour grown in different locations in Sabah, Malaysia”, Food Res., Vol. 4, 4, 2020, pp. 991-999.
11. R. Grewal, “Comparative study of functional properties of Amaranth and Buckwheat flour”, IAHRW Int. J. Soc. Sci. Rev, vol. 6, 1, 2018, pp. 16-18.
12. G. Kaur, S. Sharma, B. Singh, B. Dar, “Comparative study on functional, rheological, thermal, and morphological properties of native and modified cereal flours”, Int J Food Prop., Vol. 19, 9, 2016, pp. 1949-1961.

13. W. Hongviangjan, W. Sompongse, “Effect of tapioca starch on gel characteristics of threadfin bream surimi”, J Food Sci Agric Technol., Vol. 6, 1, 2022, pp. 30-33.
14. D. Oppong, W. Panpipat, M. Chaijan, “Chemical, physical, and functional properties of Thai indigenous brown rice flours”, PLoS One., vol. 16, 8, 2021, pp. e0255694.

DISEÑO Y EVALUACIÓN FUNCIONAL DE COMUNIDADES SINTÉTICAS BACTERIANAS CON PROPIEDADES PROMOTORAS DE CRECIMIENTO VEGETAL

Miriam Judith Zavala Alcocer[1], María Dolores Rodríguez Torres[2], María Valentina Angoa Peréz[3], Jorge Rocha[4]

[1,2,3]CIIDIR IPN Michoacán, [4]CIBNOR.
mzavalaa2400@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Las comunidades sintéticas de bacterias (SynComs) representan una herramienta biotecnológica clave en la agricultura sustentable, al ofrecer mayor estabilidad, control y predictibilidad funcional en comparación con consorcios microbianos no definidos o inóculos naturales. Estos últimos suelen presentar baja eficiencia en campo debido a la competencia con la microbiota nativa, la variabilidad ambiental y la falta de evaluación en condiciones controladas que garanticen su éxito. En contraste, las SynComs se diseñan bajo un enfoque “bottom-up”, partiendo de cultivos axénicos de cepas caracterizadas y aumentando progresivamente la complejidad para estudiar interacciones específicas y funciones emergentes, como la formación de biopelícula, la motilidad colectiva, la inhibición de patógenos y la cooperación metabólica. Este diseño racional permite ensamblar comunidades con funciones complementarias, capaces de generar microhábitats, optimizar la captura y retención de recursos y mejorar la tolerancia a estreses abióticos como la desecación[1]. En este estudio, la formulación de la comunidad sintética se realizó a partir de seis cepas bacterianas aisladas de la planta medicinal tabardillo: (1) *Bacillus safensis*, (2) *Pseudomonas* sp., (3) *Paenibacillus polymyxa*, (4) *Stenotrophomonas* sp., (5) *Paenibacillus amylolyticus*, (6) *Bacillus amyloliquefaciens*. A partir de su perfil funcional, se diseñaron múltiples combinaciones entre dos, tres, cuatro y cinco cepas para evaluar interacciones cooperativas, particularmente en la formación de biopelícula como función emergente clave. La formación de biopelícula se evaluó cuantitativamente mediante el ensayo de tinción con cristal violeta en microplacas de 96 pocillos, permitiendo determinar la densidad óptica asociada a la biomasa adherida[2]. Asimismo, se analizaron funciones metabólicas relevantes como la solubilización de fosfato y la producción de compuestos indólicos, tanto en cepas individuales como en combinaciones, con el objetivo de detectar efectos aditivos o sinérgicos. Los resultados evidenciaron que ciertas combinaciones presentaron un comportamiento superior en la formación de biopelícula respecto a cepas individuales y otras mezclas. En particular, las combinaciones 3-4-6, 2-3-4-6 y 1-2-3-5-6 mostraron incrementos significativos en biomasa adherida, superando la suma esperada de sus componentes individuales. Este comportamiento sugiere la existencia de interacciones cooperativas que favorecen la producción de matriz extracelular y la estructuración comunitaria. En conjunto, estos hallazgos confirman la presencia de propiedades emergentes derivadas del ensamblaje específico de cepas, asociadas a complementariedad metabólica, señalización intercelular y coordinación en la síntesis de exopolisacáridos, posicionando a estas combinaciones como candidatas prioritarias para su evaluación en aplicaciones biotecnológicas futuras.

INTRODUCCIÓN

La incorporación de la biotecnología a la agricultura ha consolidado un papel esencial en determinadas prácticas agrícolas, que pueden tener un impacto ambiental positivo o negativo, según se su manejo. Este sistema agrario domina por el uso intensivo de productos químicos, necesarios para aumentar la producción y combatir plagas (Vermiduero, 2024). Por lo tanto, no se pueden negar las consecuencias que está ocasiona como la contaminación de las aguas y del ambiente, la pérdida de la fertilidad de la tierra, aumento de deforestación, y la expulsión de comunidades campesinas e indígenas por uso intensivo de químicos, fertilizantes sintéticos, semillas transgénicas y agrotóxicos arrojados sin control (Ortega G., 2009).

Ante este panorama, surge la agricultura sustentable con prácticas que favorecen la regeneración de la salud de los suelos y la protección de la biodiversidad, destacándose por su mínimo uso de insumos sintéticos y dependencia de procesos ecológicos naturales. A nivel mundial se ha considerado a la agricultura sustentable como una estrategia para el desarrollo agrícola, asegurando una producción estable de alimentos y relación con el medio ambiente (Vermiduero, 2024, Ortega G.,2009). Un enfoque para lograrlo es el aprovechamiento de las interacciones de las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo para mejorar la productividad de los cultivos y la salud del suelo. Así, las soluciones microbianas proporcionan mejores opciones para los agricultores y ayudan a satisfacer la demanda aplicando prácticas agrícolas sustentables (Etesami *et al*., 2018).

Las rizobacterias que promueven el crecimiento vegetal (PGPR) son bacterias beneficiosas que residen en la rizósfera, es decir, la región del suelo en contacto por las raíces vegetales (Yang *et al.,* 2024), que viven libremente en el suelo o trabajan en relaciones simbióticas con la planta, pero están presentes cerca o incluso dentro de la planta (Hasan *et al.,* 2024). Desempeñan un papel vital en la promoción del crecimiento y la salud de las plantas a través de diversos mecanismos, convirtiéndolas en un componente clave de la agricultura sostenible (Yang *et al.,* 2024).

Las PGPR promueven el crecimiento vegetal mediante mecanismos directos e indirectos. De forma directa, producen fitohormonas como auxinas, citoquininas y giberelinas, que favorecen el desarrollo radicular, la elongación celular y el crecimiento de la planta. Además, pueden fijar nitrógeno atmosférico y solubilizar fósforo y otros minerales mediante ácidos orgánicos y enzimas, aumentando la disponibilidad de nutrientes esenciales. De manera indirecta, protegen a la planta frente a patógenos al competir por espacio y nutrientes, producir sideróforos, antibióticos y enzimas líticas, e inducir resistencia sistémica. Asimismo, ayudan a mitigar el estrés abiótico mediante sustancias protectoras y la activación de sistemas antioxidantes que reducen el daño celular en condiciones adversas (Díaz *et al*.,2018; Yang *et al.,* 2024; Hasan *et al.,* 2024).

Utilizadas como inoculantes agrícolas, las PGPR se consideran una alternativa prometedora y sostenible para mejorar la fertilidad del suelo, estimular el crecimiento vegetal y favorecer la actividad biológica del suelo debido a sus múltiples beneficios. Antes de su aplicación, estas bacterias suelen evaluarse mediante ensayos in vitro, así como en condiciones controladas de invernadero o en campo, con el propósito de confirmar sus rasgos promotores del crecimiento vegetal y determinar su potencial agronómico (Yang et al., 2024; Tariq et al., 2025). Sin embargo, el uso de PGPR como inóculos de una sola cepa presenta limitaciones debido a su comportamiento variable en distintos suelos y condiciones ambientales. Esta inconsistencia se relaciona con la competencia con el microbioma nativo y con factores fisicoquímicos del suelo, como pH, humedad y disponibilidad de nutrientes, que afectan su colonización, viabilidad y eficacia.

Así pues, para entender los mecanismos de las múltiples interacciones es necesario entender la función de los microbiomas naturales en conjunto. Sin embargo, el estudio de las comunidades naturales *in situ* suelen tener limitaciones como los cambios en las condiciones del suelo, así como la escala de estudio tan amplia. Una forma prometedora de superar dificultades para el estudio de las comunidades naturales es crear comunidades sintéticas. Estas comunidades sintéticas se basan en los sistemas sintéticos, es decir, estudiar los sistemas biológicos naturales a través de su reconstrucción controlada y simplificada, reduciendo las comunidades microbianas para estudiar sus interacciones, mecanismos y actividades colectivas que surgen, como la formación de biopelícula, motilidad emergente, producción de metabolitos e inhibición de patógenos (McCully *et al.,*2019; Tariq *et al*., 2025; Xu *et al*., 2025). La formación de biopelículas es una función emergente derivada de las interacciones entre especies microbianas, las cuales inducen la producción de una matriz extracelular que proporciona estructura, estabilidad y protección a la comunidad. Estas biopelículas favorecen la formación de microhábitats, la captura de recursos, la retención de enzimas, la adhesión a superficies y una mayor tolerancia a estreses abióticos como la desecación (Flemming *et al*., 2016). Esto permite aprovechar interacciones sinérgicas que incrementan la estabilidad y funcionalidad comunitaria en comparación con cepas individuales aisladas (Shayanthan *et al*., 2022).

Por lo tanto, esta investigación busca evaluar la interacción de co-cultivos de seis cepas bacterianas para la formulación de la comunidad sintética. Para determinar su estabilidad, se estudiará la interacción entre cepas bacterianas mediante co-cultivos, considerando la formación de biopelícula como criterio para su ensamblaje. Los resultados contribuirán al desarrollo de estrategias sostenibles para la producción y propagación de cultivos con valor económico, disminuyendo la dependencia de insumos químicos y fomentando la conservación de los ecosistemas naturales.

PARTE EXPERIMENTAL

Material microbiológico

Se utilizaron cepas de bacterias con propiedades promotoras de crecimiento vegetal previamente aisladas e identificadas molecularmente de una planta medicinal “Tabardillo” (*Piqueria trinervia)*. Se seleccionaron 6 cepas bacterianas: *Bacillus safensis, Bacillus amylolyquefaciens, Paenibacillus polymyxa, Paenibacillus amylolyticus, Stenotrophomonas* sp., *Pseudomonas* sp. Para su elección se consideró una identidad del 99.90% al 100% de una base de datos con todas las secuencias nucleotídicas. Para su activación se cultivaron en medio nutritivo a partir de las cepas purificadas mantenidas en glicerol.

Formulación de la comunidad sintética bacteriana

Se cultivaron 10 mL de suspensiones liquidas de cada cepa en medio liquido Luria Bertani (LB). Se mantuvieron en la incubadora en agitación a 100 rpm durante 3 días. Para el ajuste de la concentración bacteriana a 5x107 UFC/mL, se centrifugo cada cultivo a 2000 rpm durante 15 min, se lavaron y la pastilla con la cepa bacteriana se resuspendió en 10 mL de agua estéril. Luego, se ajustó la densidad óptica a 600 nm (OD600) a 1 ± 0.1 para normalizar la cantidad de células.

Las suspensiones se mezclaron en combinaciones en placas de microtitulación de 96 pocillos en proporciones iguales, con volumen final de 230 µL por mezcla, con los respectivos controles de cepas individuales. Una vez preparadas todas las combinaciones, se tomaron 5 µL de cada pocillo y se distribuyeron en una placa de agar Luria Bertani (LB) previamente secada al aire, formando puntos de inóculo. Estos puntos se dejaron secar 15 min, se incubaron a 30 °C durante 3 días (d), y se capturarán imágenes con una cámara digital. La apariencia de las colonias formadas en estos puntos se evaluará visualmente, comparando su arquitectura con la de las cepas individuales para identificar propiedades emergentes en las comunidades combinadas. Las colonias con arquitectura emergente confirmada en placas separadas se usarán en pasos posteriores de ensamblaje con más cepas y su análisis (Gastélum et al., 2025).

Evaluación de la formación de biopelícula

Para evaluar la capacidad de las cepas bacterianas y sus combinaciones para formar biofilm, se incubaron las cepas en medio en placas de micro titulación de 96 pocillos, en un volumen de 230 µL, ajustando la densidad a OD600 ~1. Se incubaron sin agitación a 30 °C durante 3 d para permitir la formación de biofilm. Tras la incubación, se removieron las células en suspensión y los biofilms adheridos en la superficie se tiñen con cristal violeta (0.1% w/v) durante 10 min. Luego, se lavaron las placas para eliminar el exceso de tinte, y los cristales violetas fijados en los biofilms se disolvieron en ácido acético (30%) durante 15 min. La absorbancia (OD600) del líquido que contiene el cristal violeta disuelto se mide en un lector de placas, siendo un indicador de la cantidad de biofilm formada (Gastélum et al., 2025).

Determinación de producción de indoles y solubilización de fosfato

Para la determinación de indoles totales, tanto los aislados como las combinaciones bacterianas de elección se ajustaron a una concentración de 10^8 UFC/mL, se cultivaron en caldo LB adicionado con triptófano (0.2%, v/v), y fueron incubados a 30°C con agitación constante por 10 días. Posteriormente, se centrifugaron a 10,000 rpm por 30 min a 4°C, y 100 µl del sobrenadante se colocaron en microplaca de 96 pocillos seguida de 100 µl de reactivo Salkowski (15 mL H2SO4 concentrado + 0.75 mL FeCl3 (0.5 M) + 25 mL H2O destilada); se incubó a 30°C por 30 min, y se leyó a 520 nm. La concentración de indoles se determinó mediante curva de calibración con el estándar ácido 3-indol acético (Sigma-Aldrich®) a 5 puntos (0-100 ppm; y= 0.0018x + 0.0101, R^2 =

0.9911). Los resultados se reportaron como µg equivalentes de AIA por mililitro (µg eq AIA/mL). Para la capacidad solubilizadora de fosfato, los aislados y combinaciones de elección se cultivaron en tubos con 10 mL de medio líquido Pikovskaya, y se incubaron por 7 días a 28°C en agitación; se centrifugaron a 7,000 rpm por 15 min, y se colectó el sobrenadante, del cual 100 µl se colocaron en microplaca y se añadieron 50 µl de NH4VO3 al 0.25% y 50 µl de (NH4)6MO7O24 al 5%; reposaron 5 min y se leyó su absorbancia a 420 nm. La concentración se determinó con la curva de calibración a 5 puntos (0-160 µg/mL, y = 0.0013x + 0.0461, R^2 = 0.9232). Los resultados se reportaron como µg equivalentes de P solubilizado por mililitro (µg eq P soluble/mL). (Cárdenas-Valdovinos, 2025).

RESULTADOS

Análisis filogenético

Se generó un cladograma de las 6 cepas bacterianas seleccionadas que muestra las relaciones evolutivas, indicando que, a mayor distancia más alejadas evolutivamente, y a menor distancia más cercanas evolutivamente al ancestro común. Se identificó una cepa del género *Stenotrophomonas* sp., una *Pseudomonas* sp., dos cepas de *Bacillus* y dos de *Paenibacillus*.

La rama más divergente corresponde a la cepa *Stenotrophomonas* sp. (aislada de raíz) con mayor distancia genética (0.39), lo que infiere que esta evolutivamente distante al resto del grupo. En un segundo grupo, se separa a la cepa *Pseudomonas* sp., proveniente de tallo, con distancia genética intermedia (0.11), que la sitúa genéticamente más parecida a *Bacillus* que a *Stenotrophomonas* sp. pero aun siendo de linaje independiente. Las cuatro cepas restantes forman un grupo que sugiere que son mucho más cercanas entre sí. Un grupo estrecho corresponde a las cepas *Bacillus safensis* y *Bacillus amyloliquefaciens* (ambas aisladas de la flor), que son las más cercanas entre sí (0.0217), lo que sugiere una alta similitud genética. Por último, se forma un grupo con *Paenibacillus polymyxa* (tallo) y *Paenibacillus amylolyticus* (suelo) con una distancia de 0.058, y que a pesar de pertenecer a nichos diferentes comparten un ancestro común más cercano entre sí que con las demás cepas bacterianas. Se observó que entre los miembros de los últimos dos grupos (*Bacillus* y *Paenibacillus*) hay similitud genética, lo que resulta en una redundancia funcional, es decir, desempeñan funciones similares como puede ser la producción de Ácido-Indol-Acético (AIA), solubilización de fosfato o producción de biopelícula (Gallardo *et al*., 2024).

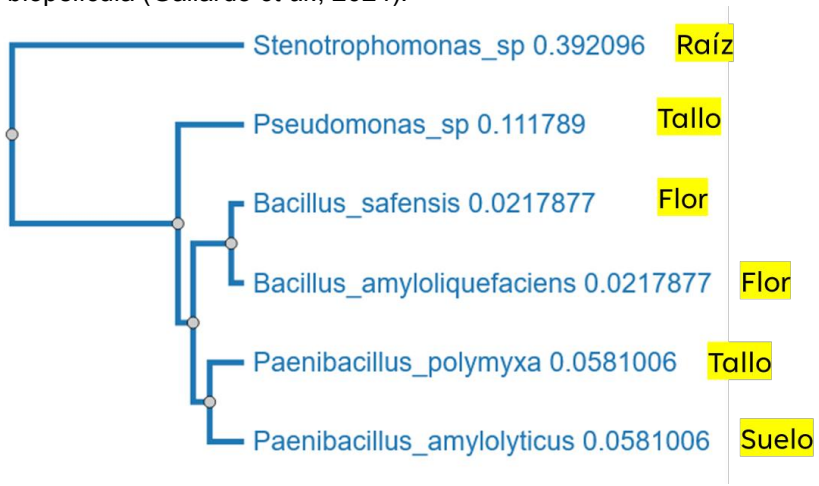


Figura 1. Árbol filogenético de las 6 cepas bacterianas a evaluar.

Evaluación de combinaciones bacterianas para el diseño de comunidades sintéticas bacterianas

Para el estudio de las interacciones y formación de biopelícula entre las seis cepas bacterianas, se consideró un enfoque de “abajo hacia arriba” en el que se evaluaron diversas combinaciones comenzando por los monocultivos hasta combinaciones de cinco cepas.

A continuación, se presenta el número al que corresponde cada cepa bacteriana y su respectiva abreviación.

No	Cepa	Abreviación
1	*Bacillus safensis*	*Bs*
2	*Pseudomonas* sp.	*Psp*
3	*Paenibacillus polymyxa*	*Pap*
4	*Stenotrophomonas* sp.	*Ssp*
5	*Paenibacillus amylolyticus*	*Paa*
6	*Bacillus amylolyquefaciens*	*Ba*

Tabla 1. Cepas bacterianas estudiadas con su respectiva abreviación.

Para la evaluación de formación de biopelícula en monocultivos y combinaciones por pares, se generó un gráfico de barras (figura 2) en el que la absorbancia (OD 600 nm) indica la formación de biopelícula absoluta.

Los resultados indican que la formación de biofilm fue mayor en co-cultivos que, en cepas individuales, cuyos valores de absorbancia van de los 0.34 a 0.61. En co-cultivos, cuatro combinaciones fueron las más prometedoras: *Bacillus safensis- Bacillus amylolyquefaciens* (1-6) con 2.27, *Pseudomonas* sp.- *Bacillus amylolyquefaciens* (2-6) con 2.04, *Paenibacillus polymyxa- Bacillus amylolyquefaciens* (3-6) con 1.85, y *Paenibacillus amylolyticus- Bacillus amylolyquefaciens* (5-6) con 2.4; destacando la participación de la cepa *Bacillus amylolyquefaciens* (6) que actúa como especie clave, pues al interactuar con las diferentes cepas promueve la formación de biopelícula. Ren et al (2015) colaboran que ciertos aislados individuales considerados como pobres formadores de biopelículas pueden mejorar su capacidad de inducción de biopelícula cuando están en combinación con otras especies debido a que en un entorno estructurado y cooperativo las especies se pueden beneficiar y contribuir a una mayor producción de biopelícula.

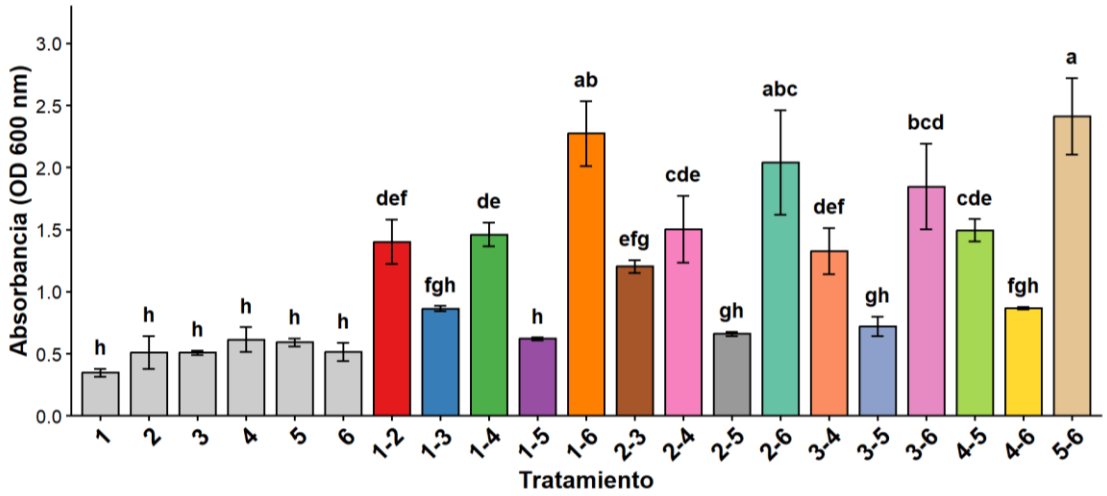


Figura 2. Absorbancia absoluta de cada combinación por pares, con las respectivas cepas individuales.

Para aumentar el nivel de complejidad en las interacciones bacterianas se adiciono una cepa bacteriana a las combinacion por pares. En esta prueba de combinaciones de tres cepas, destacaron significativamente dos comunidades: la combinación de las cepas *Bacillus safensis- Pseudomonas* sp.- *Paenibacillus amylolyticus (1-2-5)* con absorbancia de 1.627; y la combinación de *Paenibacillus polymyxa- Stenotrophomonas* sp.- *Bacillus amylolyquefaciens* (3-4-6) con 2.22.

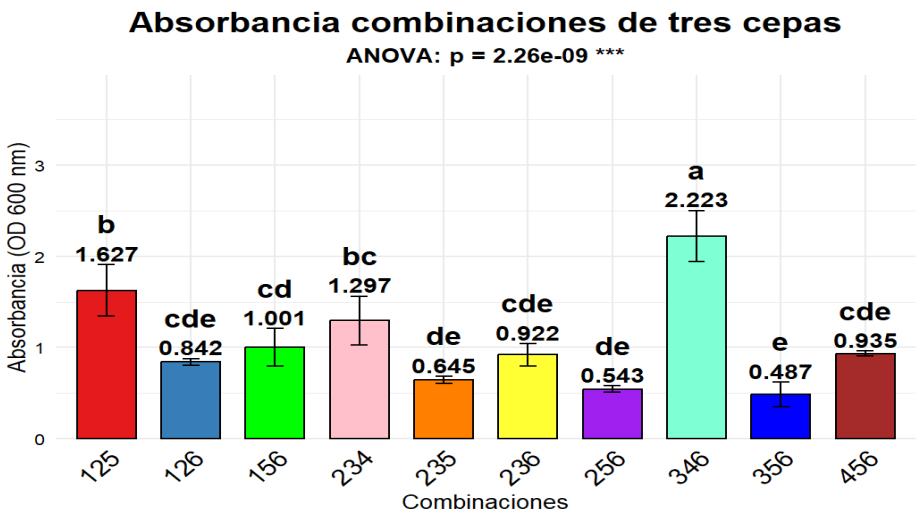


Figura 4. Absorbancia de la combinación de tres cepas bacterianas con su respectiva formación de biopelícula.

Finalmente, se realizaron combinaciones múltiples conformadas de cinco, cuatro, tres y dos cepas. Los resultados indicaron diferencias significativas en la producción de biopelícula en un grupo con alta diversidad (figura 6). Se identificó un alto comportamiento sinérgico en la combinación 1-2-3-5-6 (a) con una absorbancia de 3.08. Ren *et al* (2015) menciona que la adición de la cepa (5) *Paenibacillus amylolyticus* aporta una estructura comunitaria a las diversas combinaciones pues se evidencia que de manera individual la formación de biomasa es débil, pero en presencia de otras especies se induce la formación de biopelícula. Además, Jia, H.*M et al* (2023) sugieren que la diversificación filogenética dentro de la comunidad microbiana favorece la complementariedad funcional, es decir, permite una sinergia estable para la formación de biomasa como se representa en las combinaciones anteriores.

En conjunto, los resultados muestran como la adición progresiva de cepas clave a las combinaciones bacterianas incrementó la formación de biopelícula, lo que sugiere la presencia de interacciones sinérgicas dentro de la comunidad. La combinación 3-6 presentó una absorbancia de 1.85 y se ubicó dentro del grupo bcd. Al adicionar la cepa 4 (*Stenotrophomonas* sp.), la formación de biomasa aumentó 0.79, dando lugar a la combinación 3-4-6, la cual mostró una tendencia hacia el grupo bc. Además, al incorporar la cepa 2 (*Psedomonas* sp.) a la combinación 3-4-6, la absorbancia aumentó nuevamente 0.73, alcanzando un valor final de 2.48 en la combinación 2-3-4-6. Este comportamiento indica que la adición de un miembro clave a la interacción microbiana dentro de la comunidad genera sinergias que potencian las funciones en conjunto (Marín, O *et al*., 2021). Además, Gastélum *et al*. (2025) observaron que la inclusión de *Pseudomonas* en una combinación favoreció su dominancia durante la progresión del biofilm, alcanzando entre 40 % y 86 % del total de UFC diarias, lo que sugiere que esta cepa posee una ventaja competitiva para crecer y contribuir eficazmente a la formación de biopelículas en el medio de cultivo.

Pese a la diferencia en los miembros que componen las combinaciones, Marín *et al*., (2021) sugieren que la funcionalidad de la comunidad va más allá de la suma de funciones de los microrganismos individuales que lo componen, pues al combinar varias cepas en una SynCom, las interacciones entre ellas pueden generar efectos que no se pueden predecir a partir de los miembros individuales.

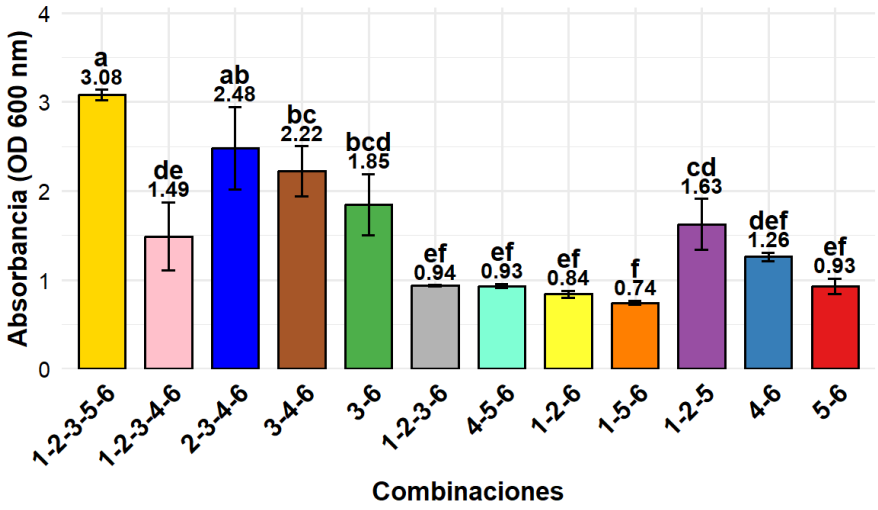
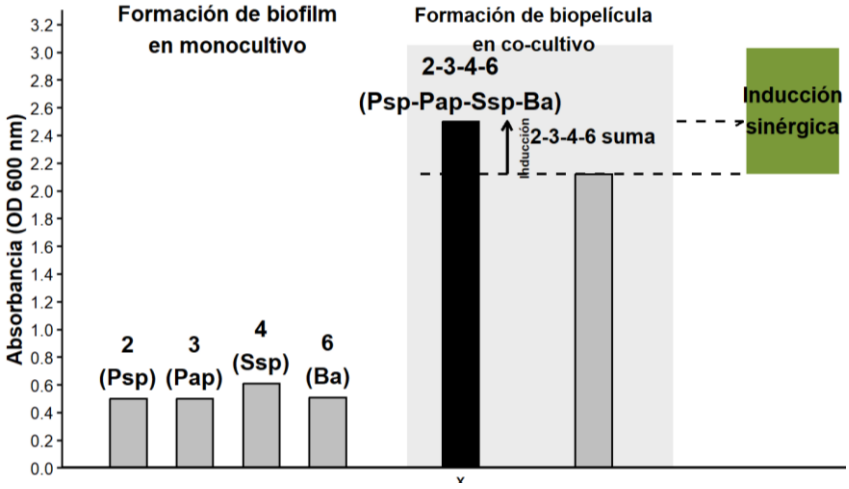


Figura 5. Análisis ANdeVA de combinaciones múltiples con la respectiva formación de biopelícula.

Evaluación de inducción sinérgica: formación de biopelícula

Para evaluar la inducción de biopelícula de las dos comunidades con significancia, se realizó una prueba considerando un enfoque de "arriba hacia abajo" que se refiere a cómo la estructura y propiedad emergente de una comunidad compleja se puede afectar o modular al eliminar miembros de esta.

Para este análisis, se presentan las respectivas gráficas que representa la inducción sinérgica para la formación de biopelícula entre los diferentes miembros de las combinaciones. Se consideró como resultado esperado a la suma de los controles individuales y resultado experimental a la absorbancia absoluta obtenida por la prueba en microplaca (barra color negro). Se tomo como criterio que un cociente de inducción mayor a 1 se considera como inducción sinérgica para la formación de biopelícula, e inhibición a un valor menor a 1.



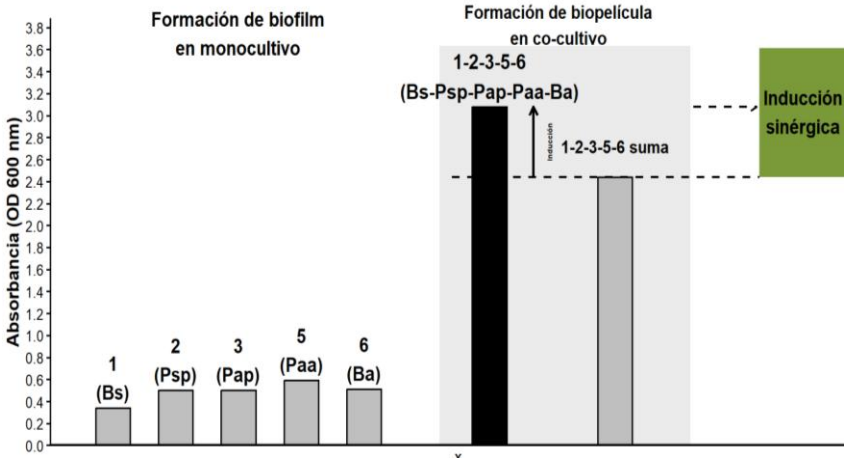


Figura 6. Representación de la inducción sinérgica de combinaciones con diferencias significativas.

Caracterización de actividades de promoción de crecimiento vegetal en monocultivos y comunidades sintéticas bacterianas

Por parte de la caracterización, los resultados muestran que las cepas individuales presentan valores más altos que las combinaciones bacterianas, especialmente para la producción de indoles. La cepa *Paenibacillus amylolyticus* (5) fue la mayor productora de indoles, seguida de *Stenotrophomonas* sp. (4) y *Pseudomonas* sp. (2). Aunque en las combinaciones se mantiene la capacidad de producir indoles, los valores son menores, lo que se puede interpretar como una posible reducción funcional por la interacción microbiana, especialmente en comunidades con mayor número de cepas.

A diferencia de la producción de indoles, donde hubo diferencias marcadas entre los tratamientos, en la solubilización de fosfato la mayoría de los tratamientos individuales se mantienen en un rango aproximado de 111 y 144 µg eq P soluble/mL. La cepa *Bacillus safensis* (1) fue la mayor solubilizadora de fosfato, seguida de *Paenibacillus polymyxa* (3) y *Pseudomonas* sp. (2). Por parte de las combinaciones, tanto la comunidad 1-2-3-5-6 y 2-3-4-6 conservaron la actividad solubilizadora cercana a la de las cepas individuales, con valores de 113.51 ± 7.11 y 105.69 ± 3.22 (µg eq P soluble/mL), respectivamente. Sin embargo, la combinación 3-4-6 presentó el valor más bajo de todos los tratamientos, con 90.30 ± 12.08 µg eq P soluble/mL.

Estos resultados indican que la combinación de cepas no necesariamente genera un efecto aditivo a las funciones evaluadas. Aunque las cepas de manera individual presenten altos valores, al integrarse en comunidad puede ocurrir una disminución de la actividad. Los resultados concuerdan con los de Molina *et al* (2017), en el que un consorcio bacteriano conformados por cuatro cepas presento, de igual manera, disminución en la producción de AIA y en la solubilización de fosfato en comparación por los productores más altos.

Tabla 3. Caracterización de bacterias individuales y comunidades sintéticas bacterianas de elección.

Combinación	Cepas	Producción indoles (µg eq AIA/ mL)	Solubilización fosfato (µg eq P soluble/ mL)	Indice de solubilización
1	Bs	33.75 ± 2.29	143.88 ± 4.25	8.6
2	Psp	140.18 ± 8.59	122.45 ± 5.00	7.25
3	Pap	59.11 ± 3.25	134.20 ± 4.30	6.2
4	Ssp	149.18 ± 35.70	111.90 ± 7.67	7.6
5	Paa	168.18 ± 4.89	111.90 ± 5.22	9.3
6	Ba	72.18 ± 4.71	118.49 ± 4.39	3
3--4--6	Pap-Ssp-Ba	41.08 ± 2.09	90.30 ± 12.08	9.3
2--3--4--6	Psp-Pap-Ssp-Ba	44.08 ± 1.51	105.69 ± 3.22	9.6
1--2--3--5--6	Bs-Psp-Pap-Paa-Ba	38.33 ± 2.71	113.51 ± 7.11	9



(3-4-6) *Pap-Ssp-Ba*



(2-3-4-6)
Psp-Pap-Ssp-Ba



(1-2-3-5-6)
Bs-Psp-Pap-Paa-Ba

CONCLUSIONES

Los co-cultivos y combinaciones multiespecie presentaron mayor formación de biopelícula que las cepas individuales, destacando *Bacillus amyloliquefaciens* como cepa clave y el efecto positivo de *Pseudomonas* sp. en combinaciones específicas, posiblemente por su ventaja competitiva durante el desarrollo del biofilm (Gastélum et al., 2025). En conjunto, las combinaciones 3-4-6, 2-3-4-6 y 1-2-3-5-6 representan comunidades con alto potencial para inducir funciones emergentes y ser consideradas en la formulación de una SynCom, con la finalidad de evaluar posteriormente su potencial en la promoción del crecimiento vegetal. Sin embargo, la caracterización mostró que la producción de indoles y la solubilización de fosfato se mantuvieron en las combinaciones, pero con valores menores respecto a los mejores productores individuales, lo que sugiere que no todas las funciones se potencian de forma sinérgica (Molina *et al*., 2017). Por lo tanto, el diseño de una comunidad sintética debe basarse en la naturaleza de las interacciones entre cepas, más que en la cantidad de microorganismos incluidos (Gallardo *et al*., 2024).

BIBLIOGRAFÍA

1. Shayanthan, A., Ordoñez, P. A. C., & Oresnik, I. J. (2022). The role of synthetic microbial communities (SynCom) in sustainable agriculture. (“The Role of Synthetic Microbial Communities (SynCom) in Sustainable ...”) Frontiers in Agronomy, 4, 896307.
2. Tariq, A., Guo, S., Farhat, F., & Shen, X. (2025). Ingeniería Comunidades Microbianas sintéticas: diversidad y aplicaciones en el suelo para la resiliencia vegetal. Agronomía, 15 (53) 513. https://doi.org/10.3390/agronomy15030513
3. Gastélum, G., Ángeles-Morales, A., Arellano-Wattenbarger, G., Coronado, Y., Guevara-Hernandez, E., & Rocha, J. (2024). Biofilm formation and maize root-colonization of seed-

endophytic Bacilli isolated from native maize landraces. Applied Soil Ecology, 199. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105390

4. Gastélum, G., Gómez-Gil, B., Olmedo-Álvarez, G., & Rocha, J. (2025). Harnessing emergent properties of microbial consortia for Agriculture: Assembly of the Xilonen SynCom. ("Harnessing emergent properties of microbial consortia for Agriculture ...") Biofilm, 9. https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2025.100284
5. Yang, P., Condrich, A., Scranton, S., Hebner, C., Lu, L., & Ali, M. A. (2024). Utilizando la creación de Rhizobacteria para promover el crecimiento de las plantas (PGPR) para avanzar en la agricultura sostenible. Bacterias, 3(4), 434-451. https://doi.org/10.3390/bacteria3040
6. Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, *156*, 225-246.
7. Díaz, S. P., Molina, D. C. M., & Tapias, D. F. R. (2018). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma, y perspectivas.
8. https://www.mdpi.com/2674-1334/3/4/30
9. Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. ("Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth ...") In Bacteria (Vol. 3, Issue 2, pp. 59–75). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/bacteria3020005
10. McCully, L. M., Bitzer, A. S., Seaton, S. C., Smith, L. M., & Silby, M. W. (2019). "Interspecies Social Spreading: Interaction between Two Sessile Soil Bacteria Leads to Emergence of Surface Motility." ("Sci-Hub | Interspecies Social Spreading: Interaction between Two ...") ("Sci-Hub | Interspecies Social Spreading: Interaction between Two ...") MSphere, 4(1). https://doi.org/10.1128/msphere.00696-18
11. Xu, X., Dinesen, C., Pioppi, A., Kovács, Á. T., & Lozano-Andrade, C. N. (2025). Composing a microbial symphony: synthetic communities for promoting plant growth. ("Composing a microbial symphony | Scholarly Publications") Trends in Microbiology.
12. Flemming, H. C., Wingender, J., Szewzyk, U., Steinberg, P., Rice, S. A., & Kjelleberg, S. (2016). Biofilms: An emergent form of bacterial life. In Nature Reviews Microbiology (Vol. 14, Issue 9, pp. 563–575). Nature Publishing Group. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94
13. Ortega, G. (2009). Agroecología vs. agricultura convencional | FAO. FAO. https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/335401/
14. Efectos de la agricultura convencional frente a ecológica en el medio ambiente. (2024, 9 mayo). Vermiduero. https://vermiduero.es/efectos-de-la-agricultura-convencional-frente-a-agricultura-sostenible/?srsltid=AfmBOoq-9ED2kMTYSo6TjyMcifOfF8VtEmwfpPq3WV15L2c6Zg6xTBMV#Agricultura_sostenible_la_union_de_tradicion_y_ecologia
15. Molina-Romero D, Baez A, Quintero-Hernández V, Castañeda-Lucio M, Fuentes-Ramírez LE, et al. (2017) Compatible bacterial mixture, tolerant to desiccation, improves maize plant growth. PLOS ONE 12(11): e0187913. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187913
16. Marín, O., González, B., & Poupin, M. J. (2021). From microbial dynamics to functionality in the rhizosphere: a systematic review of the opportunities with synthetic microbial communities. Frontiers in plant science, 12, 650609.
17. Ren, D., Madsen, J. S., Sørensen, S. J., & Burmølle, M. (2015). High prevalence of biofilm synergy among bacterial soil isolates in cocultures indicates bacterial interspecific cooperation. The ISME journal, 9(1), 81-89.
18. Jia, H. M., Li, B., Wu, Y. R., Ma, Y. T., & Yan, Z. Y. (2023). The construction of synthetic communities improved the yield and quality of Salvia miltiorrhiza Bge. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 34, 100462.

PROTOCOLO MODIFICADO DE TRIZOL® PARA LA EXTRACCIÓN DE ARN TOTAL EN TEJIDOS DE CHILE

María de la Luz Buendía-Valverde, Martha Hernández-Rodríguez,
Fernando Carlos Gómez-Merino, Libia Iris Trejo-Téllez

Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo.
buendia.luz@colpos.mx

RESUMEN

La extracción de ARN de alta calidad a partir de tejidos vegetales suele representar un desafío. Una de las principales limitaciones es que algunos protocolos de extracción no son reproducibles entre diferentes especies vegetales, lo cual puede deberse a la variabilidad de los tejidos, al nivel de polisacáridos, polifenoles, metabolitos secundarios y enzimas ribonucleasas. El objetivo de este estudio fue adaptar un protocolo basado en TRIzol® para extraer ARN total de tejidos de hoja y raíz de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.). La metodología siguió el flujo de trabajo del protocolo TRIzol® con modificaciones que consistieron en incrementar la cantidad de tejido, combinar las fases acuosas obtenidas de múltiples extracciones y realizar una segunda purificación con fenol:cloroformo:alcohol isoamílico. La concentración y pureza del ARN se evaluaron mediante espectrofotometría y su integridad mediante electroforesis en gel de agarosa desnaturalizante. El protocolo permitió obtener ARN de calidad adecuada para análisis moleculares posteriores. La adaptación fue validada utilizando muestras provenientes de plantas de chile testigo y tratadas con litio (150 μM) bajo condiciones de hidroponía. En estas muestras se obtuvo ARN en concentración entre 2682 y 4504 ng μL^{-1}, con relaciones A260/280 cercanas a 2.0 y A260/230 entre 1.67 y 2.26 en ambos tejidos, sin evidencia visible de degradación del ARN. Se concluye que la metodología modificada constituye una alternativa para la extracción de ARN total en tejidos de chile, ya que proporcionó material en cantidad suficiente, con niveles adecuados de pureza e integridad para estudios de expresión génica y otras aplicaciones transcriptómicas.

INTRODUCCIÓN

El ácido ribonucleico (ARN) es una biomolécula presente en las células vivas y virus, cuya función más conocida es la producción de proteínas mediante la traducción, aunque también interviene en la regulación génica (Wang & Farhana, 2025). Su estudio permite identificar qué genes se expresan en los distintos procesos celulares bajo ciertas condiciones. Para la extracción de esta molécula, existe una amplia variedad de métodos; sin embargo, algunos presentan limitaciones cuando se aplican a tejidos vegetales, por lo que requieren modificaciones específicas. Estas modificaciones dependen del origen de la muestra y del objetivo de estudio. En tejidos vegetales el reto es obtener al menos 10 μg de ARN total para un experimento basado en hibridación (Ramírez-Salcedo et al., 2014).

La extracción de ARN es el primer paso para llevar a cabo ensayos de expresión génica que utilizan tecnologías como la secuenciación de ARN y los microarreglos, los cuales proporcionan información de procesos metabólicos, transporte celular, entre otros (Hammad, 2023). Uno de los métodos más utilizados para realizar extracción de ARN es el de TRIzol® (Rio *et al.*, 2010), este método fue descrito por primera vez por Chomczynski & Sacchi, con el objetivo de obtener ARN íntegro y de alta calidad (Chomczynski & Sacchi, 1987).

Aunque los métodos de extracción de ARN han ido mejorando con el transcurso de los años, las modificaciones a estos métodos a menudo enfrentan dificultades, la principal es que algunos no son replicables entre las especies vegetales, lo cual puede atribuirse a la variabilidad de los tejidos, al nivel de polisacáridos, polifenoles, metabolitos secundarios y enzimas ribonucleasas (Duy *et al*.,

2015). Además, el ARN es susceptible a la degradación, principalmente por la acción de ribonucleasas, por esta razón, factores como: la toma de muestra, condiciones de frío durante la manipulación, conservación de la muestra, obtención de suficiente material (ARN) en la cuantificación son etapas determinantes en el proceso (Díaz-Alonso *et al*., 2013).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue adaptar un protocolo basado en TRIzol® para extraer ARN total de tejidos de hoja y raíz de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.), con el fin de obtener material en cantidad suficiente, con niveles óptimos de pureza e integridad, para llevar a cabo estudios transcriptómicos.

PARTE EXPERIMENTAL

Se adaptó el protocolo TRIzol® para la extracción de ARN total a partir de tejidos de hoja y raíz de chile guajillo. Para ello, se obtuvieron muestras de plantas crecidas bajo condiciones de invernadero. Se germinaron semillas en charolas de unicel de 200 cavidades. Plántulas sanas de 60 d de edad se establecieron en un sistema en hidroponía con solución nutritiva Steiner al 35 % (Steiner, 1984) formulada con reactivos grado analítico. Las plántulas fueron colocadas dentro de recipientes de plástico de 4 L, con orificios en las tapas y hule espuma como soporte. Se ajustó diariamente el pH a 5.5 ± 0.2 y se repuso el agua evaporada con agua destilada, oxigenando cada 3 h por 15 min la solución, después de la primera semana de aclimatación se sustituyó la solución cada semana a una concentración de 75 % añadiendo los tratamientos con Li en concentraciones de 0 y 150 µM a partir de cloruro de litio (LiCl, CAS 7447-41-8, Sigma Aldrich, UK) durante cuatro semanas. Cada tratamiento tuvo seis repeticiones, mismas que se distribuyeron en un diseño completamente al azar. Transcurrido el tiempo, las plantas se cosecharon y se llevaron al laboratorio para realizar las pruebas. Las condiciones de crecimiento fueron temperaturas promedio diurnas y nocturnas de 32 °C y 15 °C, respectivamente; humedad relativa de 31% en el día y 87% en la noche; intensidad luminosa de 137 µmol m^{-2} s^{-1} con un fotoperiodo de 11.5 h.

El muestreo inició con el enjuague de las plantas con agua destilada, y luego con la separación de las hojas y las raíces. Estas estructuras se pulverizaron con nitrógeno líquido en un mortero de porcelana. De este pulverizado, se pesaron 100 mg de tejido de hoja y 200 mg de raíz, los cuales se colocaron por separado en tubos para microcentrífuga de 2 mL. Durante la extracción de ARN, el tejido de hoja se separó en 2 tubos para microcentrífuga de 2 mL y la mezcla de raíz en cuatro tubos, evitando su descongelación. Para el tejido de hoja, se añadió 1 mL de TRIzol® por tubo, mezclando e incubando por 5 min, se purificó con 0.2 mL de cloroformo, se mezcló por inversión e incubó a temperatura ambiente por 5 min, las muestras se centrifugaron a 12000 rpm por 15 min a 4 °C, posteriormente, se transfirieron 500 µL de la fase acuosa de cada tubo de las muestras de hoja dentro de un nuevo tubo. Este sobrenadante conjunto, se purificó nuevamente con 1 mL de fenol:cloroformo:alcohol isoamílico (25:24:1), se mezcló por inversión y se centrifugó a 12000 rpm por 15 min a 4 °C. Enseguida se retiraron 700 µL de la fase acuosa, se adicionaron 700 µL isopropanol frío para precipitar el ARN, se mezcló por inversión e incubó por 10 min. Se centrifugó a 12000 rpm por 10 min a 4 °C, se retiró el sobrenadante por decantación y se lavó el pellet con 1 mL de ETOH-DEPC 75%. Inmediatamente después, el pellet se recuperó centrifugando a 12000 rpm por 5 min a 4 °C, se decantó el sobrenadante, se secó el pellet por 40 min, transcurrido el tiempo, se resuspendió en 40 µL de H_2O-DEPC, se guardó a -80 °C y se cuantificó un día después en espectrofotómetro UV-Vis NanoDrop™ 2000. Para el tejido de raíz, se procedió de la misma manera, conjuntando los sobrenadantes después de la segunda purificación. Al término del proceso se obtuvieron cuatro repeticiones por tratamiento. Finalmente se realizó un gel de agarosa en condiciones desnaturalizantes (Sambrook y Russell, 2001) para evaluar la integridad de ARN.

RESULTADOS

El protocolo adaptado permitió obtener ARN total en concentraciones superiores a 2000 ng μL^{-1} en todos los tratamientos evaluados (Cuadro 1). En tejido de hoja, las concentraciones oscilaron entre 2794.8 a 4090.9 ng μL^{-1}, con promedio de 3347.4 ± 395.5 ng μL^{-1}, mientras que en tejido de raíz se

obtuvieron valores entre 2682.6 y 4504.4 ng μL^{-1}, con promedio de 3550.7 ± 650.7 ng μL^{-1}. Aunque el objetivo principal de este estudio fue evaluar el desempeño del protocolo adaptado, durante su validación se observaron diferencias en la concentración de ARN entre tratamientos con litio. Por ejemplo, en tejido de hoja se obtuvo una concentración similar de ARN entre el control (3430.6 ± 568.7 ng μL^{-1}) y el tratamiento con litio (3264.2 ± 151.7 ng μL^{-1}). En contraste, en tejido de raíz el tratamiento testigo presentó una mayor concentración de ARN mayor (4123.8 ± 269.1 ng μL^{-1}) en relación al tratamiento con litio (2977.5 ± 198.1 ng μL^{-1}). El tratamiento con litio redujo el rendimiento de ARN en aproximadamente 28 % con respecto al testigo.

Cuadro 1. Lecturas de cuantificación de ARN total en espectrofotómetro Nanodrop de tejido de hoja y raíz expuestas a 0 μM Li (grupo testigo) y 150 μM Li (grupo experimental) de plantas de chile guajillo.

Órgano	Concentración Li (μM)	Repetición	Concentración (ng μL^{-1})	A260/280	A260/230
Hoja	0	1	2794.8	2.07	2.16
Hoja	0	2	3673.3	2.06	2.07
Hoja	0	3	4090.9	2.05	2.10
Hoja	0	4	3163.5	2.07	1.98
Hoja	150	1	3170.6	2.07	2.07
Hoja	150	2	3296.9	2.06	2.11
Hoja	150	3	3125.2	2.07	2.13
Hoja	150	4	3463.9	2.00	1.92
Raíz	0	1	4123.8	2.02	1.99
Raíz	0	2	4504.4	1.99	1.89
Raíz	0	3	3927.8	2.00	1.67
Raíz	0	4	3939.4	1.99	1.75
Raíz	150	1	3074.1	2.02	2.10
Raíz	150	2	3046.4	2.01	2.00
Raíz	150	3	3107.0	2.02	2.13
Raíz	150	4	2682.6	2.01	2.26

En cuanto a la pureza del ARN, se observó que el protocolo modificado permite obtener valores de pureza óptimos en tejidos de chile. En este caso, las relaciones A260/280 fueron cercanas a 2.0 en todos los casos, con valores entre 1.99 y 2.07, indicando una adecuada pureza del ARN y una baja contaminación por proteínas. De manera similar, las relaciones A260/230 oscilaron entre 1.67 y 2.26, lo que sugiere una baja contaminación por compuestos fenólicos, polisacáridos y metabolitos secundarios interferentes en reacciones enzimáticas posteriores como la PCR (Cuadro 1). Estos valores de pureza fueron consistentes con perfiles espectrales asociados a muestras de ARN con adecuada pureza caracterizados por una absorbancia máxima a 260 nm y una disminución progresiva hacia 280 nm (Matlock, 2015), como se muestra para el ARN proveniente de tejido de hoja (Figura 1) y el de raíz (Figura 2).

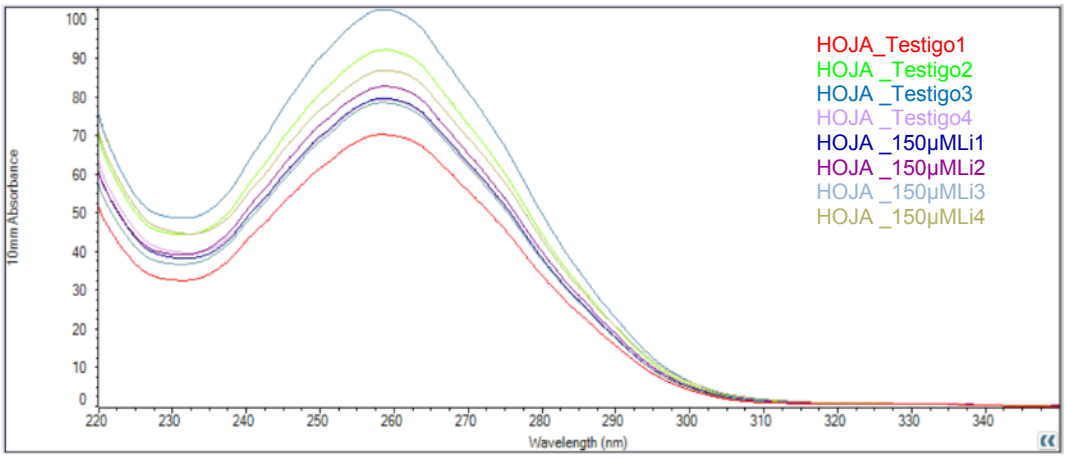


Figura 1. Espectro de absorbancia de ARN total extraído de hojas de chile testigo y tratadas con litio (150 µM).

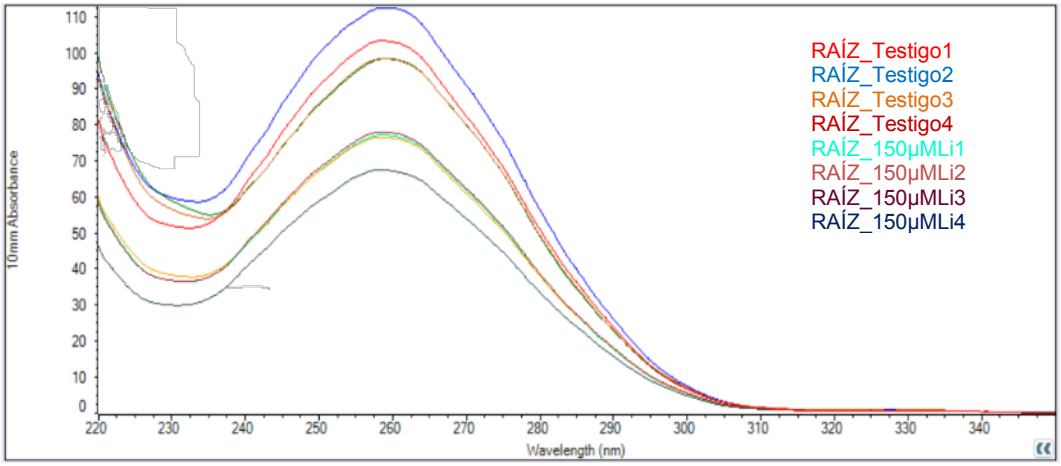


Figura 2. Espectro de absorbancia de ARN total extraído de raíces de chile testigo y tratadas con litio (150 µM).

En concordancia con la concentración y la pureza, las muestras de ARN obtenidas mediante la metodología optimizada mostraron bandas de ARN ribosomal 28 S y 18 S claramente definidas y de mayor intensidad relativa respecto al ARN de interferencia, indicando una adecuada conservación de la integridad del ARN (Figura 3). Estos resultados sugieren que el protocolo modificado permitió obtener ARN de alta calidad para análisis posteriores de expresión génica. Asimismo, el protocolo mostró un desempeño consistente tanto en hojas como en raíces de plantas testigo y tratadas con litio, lo que evidencia su aplicabilidad en diferentes tipos de muestras vegetales de chile.

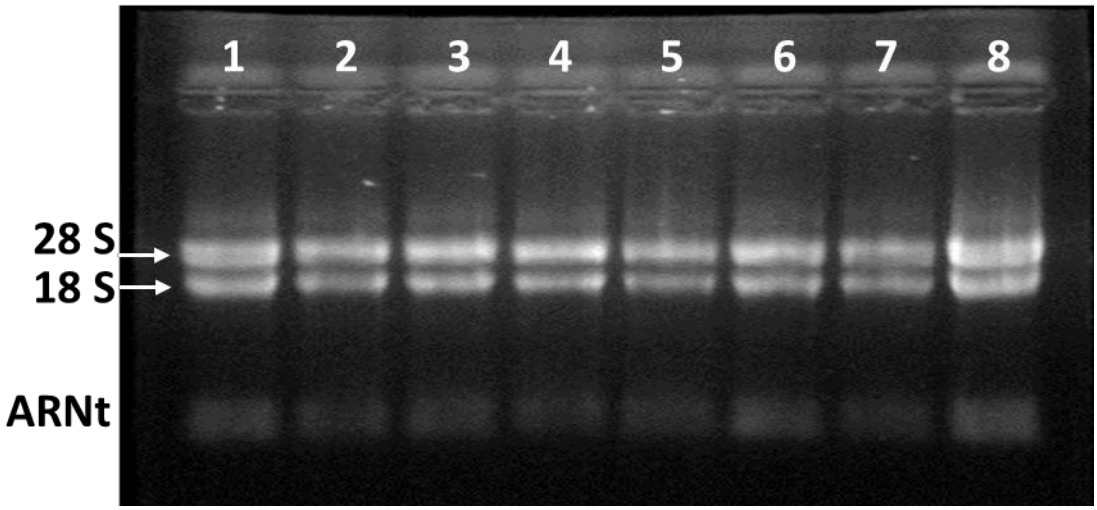


Figura 3. Prueba de integridad del ARN en gel de agarosa en condiciones desnaturalizantes. Carriles 1 y 2 ARN de hoja testigo; 3 y 4 ARN de hoja 150 μM Li; carriles 5 y 6 ARN de raíz testigo; y carriles 7 y 8 ARN de raíz 150 μM Li.

CONCLUSIONES

El protocolo optimizado de TRIzol® permitió obtener ARN integro, con alta pureza y concentración, a partir de tejidos de hoja y raíz de chile guajillo. Las modificaciones implementadas favorecieron la recuperación de material de calidad adecuada para estudios de expresión génica y aplicaciones transcriptómicas. Por tanto, esta metodología de TRIzol® modificada contribuye al conocimiento sobre los métodos de extracción de ARN total en diferentes tejidos de chile.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. A. Steiner, “The universal nutrient solution”, in *6th International Congress on Soilless Culture*, Wageningen, The Netherlands. 1984, pp. 633-650.
2. B. Matlock, Assessment of Nucleic Acid Purity. Technical Note 52646, 2015,1-2 p
3. C. Díaz-Alonso, H. Garrote-Santana, A. M. Amor-Vigil, Y. Suárez-González, & R. González-Mugica, “Cuantificación de ácido ribonucleico para la realización de la técnica de RT-PCR”, Rev. Cub. Hematol. Inmunol. Hemoter., Vol. 29, 3, 2013, pp. 298-303.
4. D. C. Rio, M. Ares, G. J. Hannon, & T. W. Nilsen, “Purification of RNA using TRIzol (TRI reagent)”, Cold Spring Harb. Protoc., Vol. 6, 2010.
5. D. Wang, A. Farhana, “Biochemistry, RNA structure”, National Library of Medicine, 2025.
6. J. Duy, J. W. Koehler, A. N. Honko, & T. D. Minogue, “Optimized microRNA purification from TRIzol-treated plasma”. BMC Genom., 16, 1, 2015, 95.
7. J. Ramírez-Salcedo, L. Chávez-González, J. L. Santillán-Torres, S. Guzmán-León, “Microarreglos de ADN: fabricación, proceso y análisis”. En: A. Cornejo-Romero, A. Serrato-Díaz, B. Rendón-Aguilar, M. G. Rocha-Munive (eds.), “Herramientas moleculares aplicadas en ecología: Aspectos teóricos y prácticos”. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Tlalpan, México, 2014, pp. 203-229.
8. J. Sambrook & D. W. Russell, Protocol 6. Separation of RNA according to size: electrophoresis of RNA through agarose gels containing formaldehyde. in *Molecular Cloning: A Laboratory Manual* (3rd ed., Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, NY, 2001).
9. M. O. Hammad, “Simplified protocol modification of TRIzol method for extraction of high-quality RNA yield from RNase-rich rat pancreas. Process Biochem., Vol. 130, 2023, pp. 464-471.
10. P. Chomczynski & N. Sacchi, “Single-step method of RNA isolation by acid guanidinium thiocyanate-phenol-chloroform extraction”, Anal. Biochem., Vol. 162, 1, 1987, pp.156-159.

¿QUÉ BUSCAN LOS CONSUMIDORES EN UN ADEREZO? EVIDENCIA PARA EL DESARROLLO DE PRODUCTOS SALUDABLES

Laura Gabriela Espinosa-Alonso[1]*, María Fernanda Jauregui Angulo[1], Rosa Luz Gómez Peraza[1], Sergio Medina Godoy[1], Simey de Jesús Felix Flores[2], Monserrat Armenta Arroyo[2].

[1]Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR. [2]Tecnológico Nacional de México, Campus Los Mochis, Escuela de Ingeniería Bioquímica.

*lespinosaa@ipn.mx

RESUMEN

La industria alimentaria enfrenta el desafío de reformular sus productos para reducir los sellos del etiquetado sin afectar su atractivo comercial. Esto exige innovación en ingredientes y tecnologías, generando oportunidades para el desarrollo de alimentos más saludables y sostenibles. En este contexto, el presente estudio surge de la necesidad de diseñar un aderezo innovador que incorpore subproductos agroindustriales de origen vegetal, promoviendo la producción y el consumo responsables, así como la reducción del desperdicio de alimentos. El objetivo de este trabajo fue recopilar información clave para identificar las preferencias del consumidor, para el desarrollo de un aderezo saludable. Se aplicó una encuesta digital mediante Google Forms, organizada en cuatro categorías: identificación de la población encuestada, gustos y preferencias, sabores y consistencia, y aspectos comerciales. Las preguntas, tanto cerradas como abiertas, incluyeron datos ordinales y categóricos, analizados con el programa Likert de R. Los resultados muestran que los consumidores potenciales son principalmente mujeres de entre 20 y 30 años, estudiantes o empleadas, de las cuales el 70% consume aderezos entre una y tres veces por semana. Se prefieren los aderezos cremosos sobre las vinagretas, y los procesados comerciales sobre los caseros. Su consumo se da mayormente con antojitos y botanas, comida rápida, ensaladas y sándwiches. En términos de sabor, la preferencia se inclina hacia lo agridulce, seguido de lo salado y picante. Se prefiere una consistencia intermedia, con cierta aceptación por texturas más espesas y con ingredientes crocantes. Entre los elementos base del sabor destacan los granos y semillas, seguidos de vegetales y frutas. Los ingredientes más atractivos incluyen mango, arándanos, tomate, cilantro y frutos secos, con un nivel de picor moderado, siendo el chile chipotle el más popular sobre otras variedades como jalapeño o chile de árbol. En cuanto a las preferencias comerciales, la mayoría de los consumidores optan por una versión regular del aderezo, en lugar de una versión baja en calorías o light. Además, existe un interés generalizado por probar un aderezo con beneficios nutracéuticos, con disposición a pagar entre $50 y $100 pesos por una presentación de 340 mL. Estos hallazgos reflejan un marco de referencia clave para la selección de ingredientes para el aderezo de interés, que cubran la demanda de productos innovadores que combinen ingredientes funcionales con sabores familiares y atractivos. La incorporación de ingredientes naturales y locales representa una estrategia sostenible y de valor agregado para la industria de los aderezos, alineada con las tendencias actuales de alimentación responsable.

INTRODUCCIÓN

TENDENCIAS ACTUALES DEL CONSUMIDOR

En las últimas décadas, a nivel global, distintos factores como el aumento en la prevalencia de enfermedades crónicas, el envejecimiento poblacional, el mayor acceso a información nutricional, así como cambios económicos y demográfico, han influido fuertemente en la modificación de los hábitos de consumo. Con estos cambios, el consumidor ha dejado de ser un agente pasivo para asumir un papel más activo en la selección de alimentos, dando prioridad a aquellos que contribuyen a la prevención de enfermedades y al mantenimiento de la salud integral, esto es, el bienestar físico, mental y emocional, lo que ha impulsado al desarrollo de alimentos funcionales orientados a mejorar el estado de ánimo, reducir el estrés y favorecer la salud cognitiva. Otro aspecto de gran interés es

para los productos con un aporte energético adecuado que permitan un control del peso corporal, mantenimiento de la masa muscular, salud digestiva y la reposición de nutrientes, así como el fortalecimiento del sistema inmunológico, aspectos directamente relacionados con el envejecimiento saludable. Las preferencias del consumidor van más allá de las características sensoriales atractivas, el consumidor actualmente demanda productos con aporte y beneficios específicos a la salud, incluyendo el cuidado de la piel y la apariencia (Innova Market Insights, 2025; The Food Tech, 2025). Otra tendencia a resaltar es la preferencia por alimentos naturales y de "etiqueta limpia" (clean label), que se caracterizan por tener un bajo grado de procesamiento, la ausencia de aditivos artificiales y el uso de ingredientes simples, como resultado a la desconfianza hacia los alimentos ultraprocesados (Byarugaba et al., 2020). Por otro lado, la sostenibilidad se ha convertido en un criterio relevante en la decisión de compra. Se observa una mayor valoración de ingredientes locales, el aprovechamiento de subproductos y la reducción del desperdicio. A la par, el consumidor demanda información clara en el etiquetado, busca productos convenientes y adaptados a sus necesidades, y evalúa la relación entre calidad y precio (Voice of the Consumer, 2025).

Sin embargo, a pesar de estas tendencias, el sabor continúa siendo el principal factor de elección, acompañado de atributos como textura, color y apariencia.

DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS

En esta búsqueda de nuevo productos, es vital que la ciencia esté al servicio del consumidor, esto es, anteponer el beneficio público por encima del interés comercial, lo que conlleva a determinar los efectos reales de estos nuevos ingredientes funcionales o productos, a través de su biodisponibilidad, identificación de factores ambientales y marcadores genéticos de grupos diana que se beneficien por su consumo, teniendo como finalidad que los nuevos alimentos o alimentos funcionales se midan por sus beneficios reales en la salud y bienestar de la población y no sólo por el volumen de venta.

La industria alimentaria ha experimentado una evolución acelerada, impulsada no sólo por los avances tecnológicos, sino por la necesidad de responder a las demandas de un consumidor más informado y exigente. El desarrollo de nuevos productos constituye una estrategia fundamental para mantener la competitividad en mercados nacionales e internacionales, al mismo tiempo que permite atender necesidades específicas relacionadas con la salud y el bienestar.

El desarrollo de alimentos innovadores implica no solo la formulación de productos con propiedades funcionales, sino también la optimización de atributos como la vida útil, la estabilidad física y microbiológica, y la aceptación sensorial. Estos factores influyen directamente en la aceptación del producto y en su posicionamiento dentro del mercado (García et al., 2007).

Por otra parte, es evidente que las diferencias generacionales han dado lugar a una necesidad de innovación más segmentada y personalizada, factor determinante en el diseño de nuevos alimentos. (Innova Market Insights, 2025). En este proceso, es primordial que la ciencia y la tecnología alimentaria se orienten hacia el beneficio del consumidor. Esto significa, evaluar de manera rigurosa los efectos reales de los ingredientes funcionales, considerando aspectos como su biodisponibilidad, así como la identificación de variables ambientales y genéticas que puedan influir en su efecto sobre poblaciones específicas. De este modo, el valor de los nuevos productos debe sustentarse en evidencias científicas que respalden sus beneficios para la salud, más allá de su potencial comercial. Desarrollar un producto implica la evaluación de todas las variables de la formulación y proceso que impacten en sus características fisicoquímicas, microbiológicas, condiciones de almacenamiento y por ende en su vida útil, pero, además, que sea del completo agrado del consumidor.

IMPORTANCIA DE LOS ADEREZOS

Los aderezos son componentes muy importantes dentro de la alimentación cotidiana, no solo por su principal función, que es intensificar el sabor de los alimentos, sino también por su papel en la promoción del consumo de vegetales. La incorporación en una amplia variedad de ingredientes ha dado como resultado obtener productos versátiles que son integrados no sólo a las ensaladas, sino hasta a alimentos de consumo rápido.

A pesar de su popularidad, muchas formulaciones comerciales se caracterizan por elevados contenidos de grasa y azúcares, lo que limita su valor nutricional. Esto ha favorecido el interés por desarrollar alternativas más saludables que además mantengan sus propiedades sensoriales, en términos de sabor, textura y estabilidad (Reza, 2016).

El desarrollo de aderezos bajos en grasa implica la modificación de la formulación tradicional, principalmente mediante la reducción del contenido lipídico y su sustitución parcial con sistemas hidrocoloidales. En estos sistemas, el agua actúa como fase continua, mientras que hidrocoloides como gomas (por ejemplo, alginatos y xantanas) contribuyen a reproducir las características reológicas típicas de las emulsiones convencionales, permitiendo alcanzar viscosidades y texturas similares a las de los productos tradicionales (Talens et al, 2025).

En la actualidad, los aderezos reducidos en grasa han evolucionado hacia propuestas con valor agregado, incorporando ingredientes con potencial funcional y manteniendo niveles adecuados de aceptabilidad sensorial. Diversos estudios han reportado que los consumidores muestran preferencia por perfiles de sabor agridulce, texturas intermedias e incluso formulaciones con partículas perceptibles, así como por el uso de ingredientes naturales, tales como frutas, semillas y especias. De manera paralela, se ha incrementado el interés por productos que aporten compuestos bioactivos, especialmente antioxidantes de origen vegetal.

A pesar de su relevancia, aún es limitada la información que integra las preferencias del consumidor con el desarrollo tecnológico de aderezos. Es por ello que, el presente estudio se enfoca en identificar dichas preferencias como base para el diseño de formulaciones innovadoras que combinen aceptabilidad sensorial, funcionalidad y criterios de sostenibilidad.

PARTE EXPERIMENTAL

Se aplicó una encuesta digital mediante Google Forms, organizada en cuatro categorías: 1) variables demográficas para identificación de la población encuestada, 2) gustos y preferencias, 3) sabores y consistencia, y 4) atributos de salud, como parte de los aspectos comerciales. El número de encuestados fue de 100 personas. La información colectada se categorizó en respuestas ordinales y nominales y fue analizada con los paquetes Excel y Likert en el lenguaje R. Se emplearon métodos estándar en estudios de aceptación de atributos sensoriales. Se calcularon porcentajes de aceptación y se utilizaron gráficos de barras, análisis de frecuencia, distribución de datos, asociaciones mediante residuos de Pearson, análisis de correspondencias y correlación de Spearman a través de escalas hedónicas y respuestas dicotómicas.



Figura 1. Encuesta digital realizada en Google forms, para conocer los hábitos de consumo y sus preferencias alimentarias, para el desarrollo de un alimento saludable.

Para analizar los sabores básicos preferidos (ácido, agridulce, salado, dulce, umami) se hizo un análisis de frecuencias y la visualización gráfica, a partir de la distribución de preferencias hedónicas de cinco puntos, sin asumir escalas continuas, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 8589 para estudios de preferencia. Las preferencias por ingredientes se evaluaron mediante preguntas dicotómicas (Sí/No) y se calcularon porcentajes de aceptación. Además, se exploraron las asociaciones entre el sabor básico preferido (variable nominal) y la preferencia por ingredientes

(dicotómica) mediante un análisis de correspondencia, además de la prueba de Fisher/chi-cuadrado (cuando n es suficiente) para cada combinación, para determinar la significancia estadística y se visualizan los residuos de Pearson. Con respecto a la pungencia, se evaluó la relación entre tolerancia general al picante y pungencia deseada en aderezos mediante correlación de Spearman y visualización de frecuencias conjuntas, este análisis permite entender si el deseo de picante en productos es consistente con la tolerancia de cada individuo.

Para identificar las preferencias por tipo de chile (escala 1–6) se calcularon medias y desviaciones estándar por tipo de chile y se presentaron como boxplots, además se compararon las distribuciones ordinales de pungencia entre tipos de aderezo mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Mientras que los crocantes se evaluaron en una escala de 1 a 5 y se realizó la distribución de frecuencias. Para evaluar la pungencia deseada por tipo de aderezo, se compararon las distribuciones ordinales de pungencia entre tipos de aderezo mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Además, se correlacionó la pungencia deseada en cada aderezo con la tolerancia general al picante.

Los atributos de salud (bajo en calorías, rico en fibra, bajo en grasa, bajo en azúcar, bajo en sodio, sin conservadores y con conservadores naturales) se evaluaron mediante escalas tipo Likert de cinco niveles, las cuales fueron posteriormente codificadas en formato ordinal y numérico para su análisis. Inicialmente, se calcularon estadísticos descriptivos (media, desviación estándar y mediana) para cada atributo, complementados con representaciones gráficas (diagramas Likert y mapas de calor) para identificar patrones de interés en la muestra total y por grupos demográficos. Posteriormente, se aplicaron pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis para grupos de edad y Mann-Whitney para sexo) con el fin de evaluar diferencias significativas en la importancia atribuida a cada variable. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con estandarización de variables para tener una comprensión profunda del comportamiento del consumidor en términos de salud.

RESULTADOS

IDENTIFICACIÓN DE LA POBLACIÓN

La población elegida presenta un sesgo importante, el grupo más representado en la encuesta son mujeres que constituyen el 65%, mientras que el 35% restante son hombres. Los encuestados se sitúan entre los 20 y 60 años, siendo los jóvenes de entre 20 y 30 años los más representativos (56%) y que, además, son los posibles consumidores de aderezos, ya que, encontrándose en una etapa estudiantil, pueden tener más acceso a comida rápida, por tanto, al consumo de aderezos. Además, se trata de una población con alto nivel de estudios, donde 59% son estudiantes de nivel licenciatura y 33% se encuentran realizando estudios de posgrado, lo que puede tener un amplio sesgo hacia una la población más informada (Figura 2).

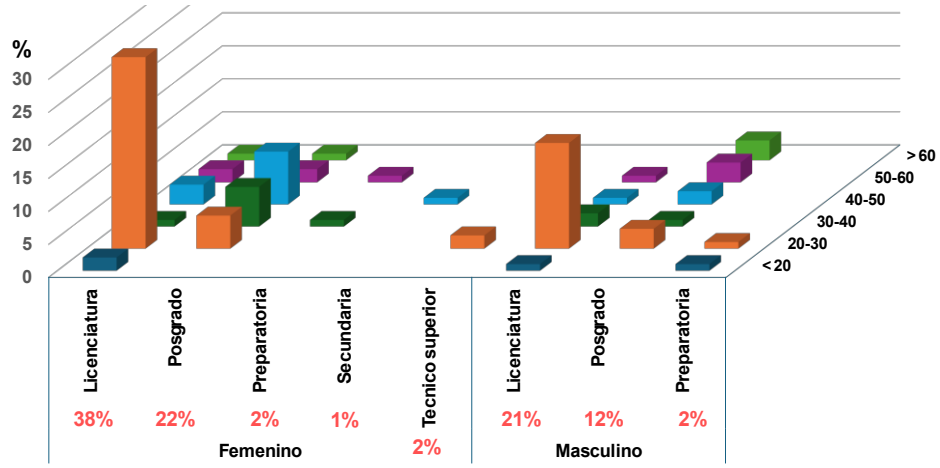


Figura 2. Descripción de la población encuestada como posibles consumidores de aderezos.

Por otra parte, en una encuesta que tiene la finalidad de recopilar datos que permitan identificar los factores más importantes a considerar en el desarrollo de un nuevo aderezo, la elección de la población a quien va dirigido el producto es fundamental que los encuestados tengan un gusto por los aderezos y que además los acostumbren en su dieta.

GUSTOS Y PREFERENCIAS

Al explorar el gusto por los aderezos (Figura 3), se utilizó una escala Likert de cinco puntos, desde me gustan mucho (verde intenso), hasta me disgustan mucho (rojo), pasando por ni me gustan ni me disgustan (amarillo). El resultado indica que el 87% de la población tiene gusto por los aderezos, lo cual confirma que la encuesta puede estar bien dirigida. Así mismo, el gusto por los aderezos resulto mayor para los BBQ > cremosos > dip > vinagreta. Las vinagretas presentaron menor aceptación (53 %) y un mayor porcentaje de respuestas neutras o de rechazo, lo que indica una preferencia marcada por perfiles sensoriales más intensos y cremosos frente a opciones más ácidas o ligeras.

En cuanto a la frecuencia de consumo, 34% los consume una vez por semana; 25% una o dos veces al mes; 24% tres veces a la semana, 7% más de 5 veces a la semana y 10% rara vez. La frecuencia de consumo de aderezos mostró variabilidad según grupo demográfico. Las mujeres reportaron un consumo ligeramente más frecuente que los hombres, mientras que el grupo de 20-30 años presentó los niveles más altos de consumo semanal.

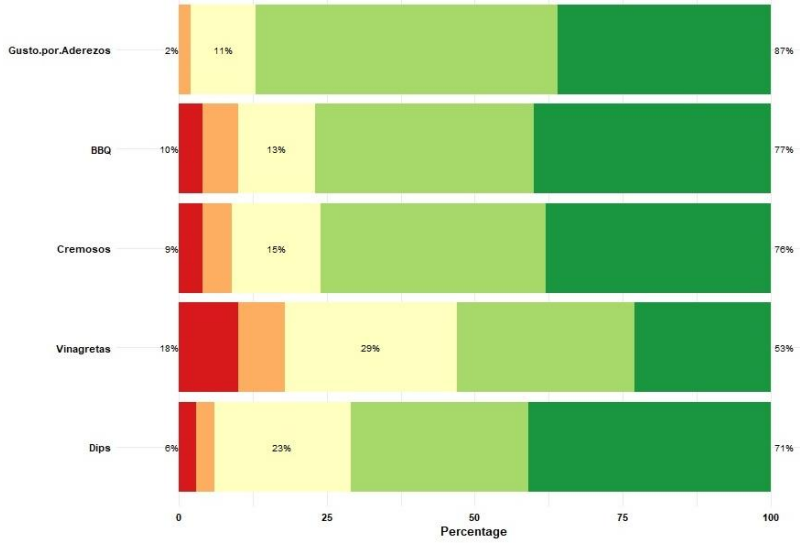


Figura 3. Aceptación general y preferencia de consumo de aderezos.

SABORES Y CONSISTENCIA

Una pregunta clave para identificar los ingredientes de mayor agrado en los consumidores fue sobre el sabor de los aderezos, de manera que se indagó la preferencia sobre los sabores básicos, los resultados revelaron que hasta un 52% prefiere los sabores agridulces, 21% los salados, 12% umami, 9% dulces y 6% ácidos (Figura 4). Los resultados describen patrones claros en las preferencias sensoriales de los consumidores hacia los aderezos. El sabor Agridulce fue ampliamente dominante, lo que confirma la tendencia observada en estudios sensoriales donde las combinaciones de sabores contrastantes generan mayor aceptación hedónica (Piqueras-Fiszman & Spence, 2015).

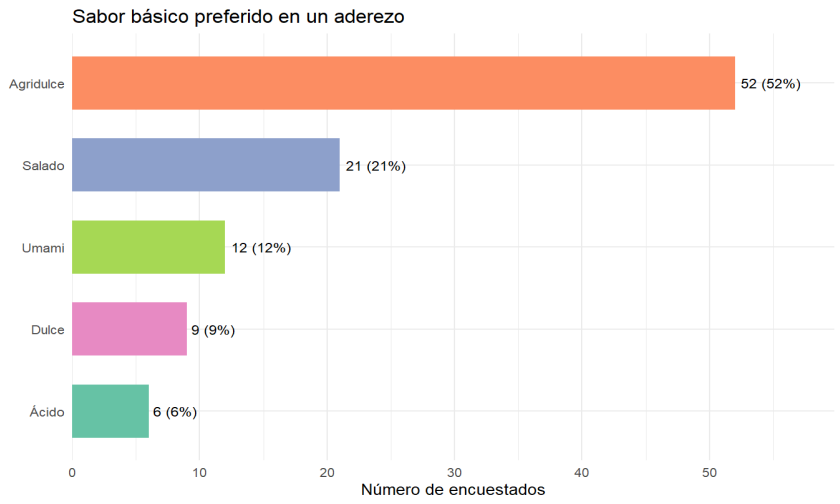


Figura 4. Sabor básico preferido para un aderezo.

Adicionalmente, los tipos de ingredientes más aceptados (respuestas categóricas, si y no) para un aderezo fueron los cremosos (82%) > vegetales (71%) >picantes (69%), dulces (69%), ácidos (67%), semillas y granos (62%) y frutales (58%) (Figura 5). La alta preferencia por ingredientes cremosos y vegetales es consistente con la literatura que identifica la cremosidad como uno de los atributos más influyentes en la palatabilidad de alimentos (Rolls, 2011; Chen & Eaton, 2012).

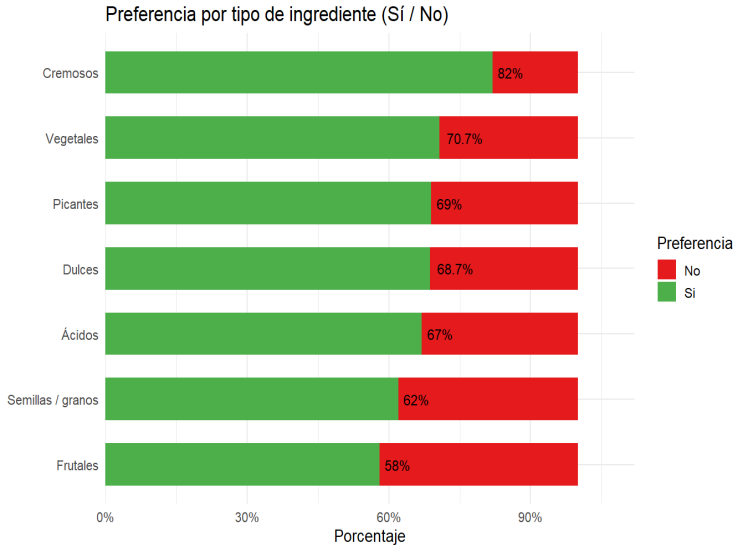


Figura 5. Preferencia por tipo de ingrediente, para un aderezo.

Tratando de asociar el sabor preferido con el tipo de ingrediente seleccionado, en la Figura 6 podemos observar que las asociaciones positivas más fuertes fueron dulce con dulces (1.13), ácido con ácidos (0.99), salado con vegetales (0.82); mientras que las correlaciones moderadas se dan entre salado con picantes (0.66), ácido con semillas y granos (0.66), dulce con cremosos (0.6), dulce con semillas y granos (0.60), umami con vegetales (0.52), agridulce con dulces (0.5), agridulce con semillas y granos (0.49) y ácido con picantes (0.42).

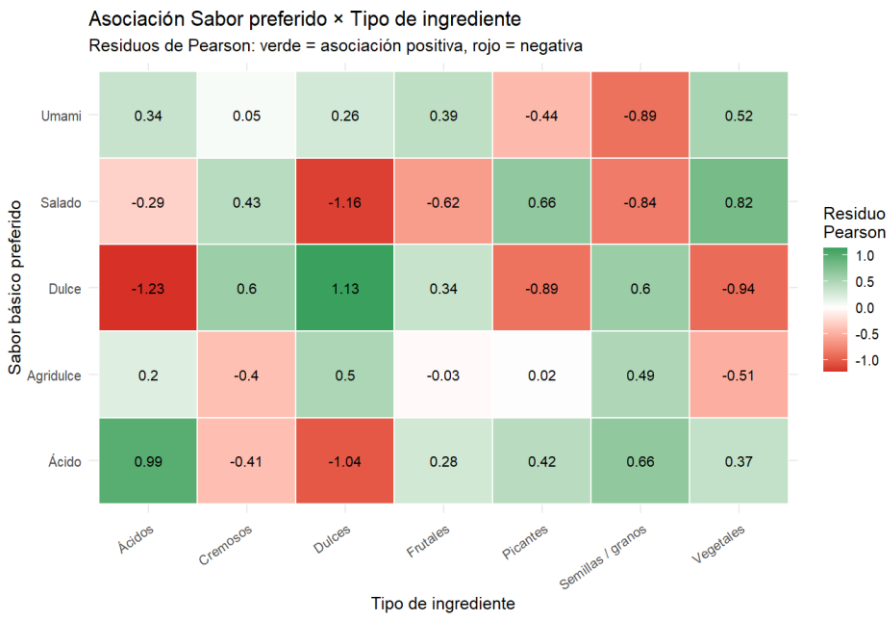


Figura 6. Asociación entre sabor preferido con tipo de ingrediente para un aderezo.

Con respecto al nivel de pungencia preferido para un aderezo cremoso y dip, por arriba del 60% indico un nivel moderado y alrededor de 20% sin pungencia, mientras que el otro 20% eligió un nivel muy alto; sin embargo, para BBQ y vinagreta sólo 9% eligieron un valor alto y de 32 a 46% sin picante (Figura 7).

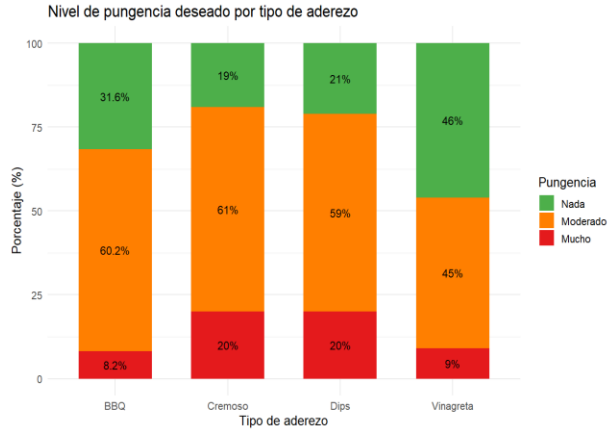


Figura 7. Nivel de pungencia deseado por tipo de aderezo.

Se pudo comprobar la alta correlación entre tolerancia general al picante y el nivel de pungencia deseada en aderezos ($\rho = 0.744$, $p < 0.001$) (Figura 8), esto sugiere que el picante no actúa como un atributo polarizante, sino como un refuerzo en las personas más familiarizadas con el picante, tal como han reportado Nolden y Hayes (2017) y Byrnes y Hayes (2016).

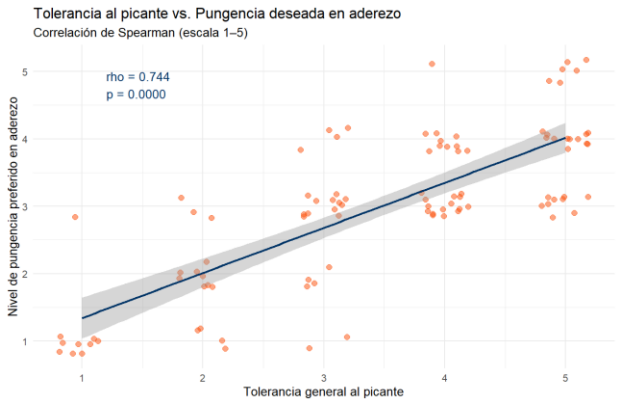


Figura 8. Relación entre tolerancia al picante y el nivel de pungencia deseado en un aderezo.

La figura 9 muestra la selección del tipo de chile preferido para el aderezo, cuya categoría fue de 1 a 6 siendo 6 el de mayor preferencia, destacando chipotle > jalapeño > serrano > de árbol > chiltepín > habanero, lo que demuestra una clara preferencia cultural mexicana por perfiles de pungencia media-alta con notas ahumadas y frescas, como las del chile chipotle y jalapeño. Por el contrario, con menor aceptación, probablemente debido a su intensidad extrema, fue el habanero, que coincide con los estudios sobre umbrales de capsaicina (Lawless et al., 2012).

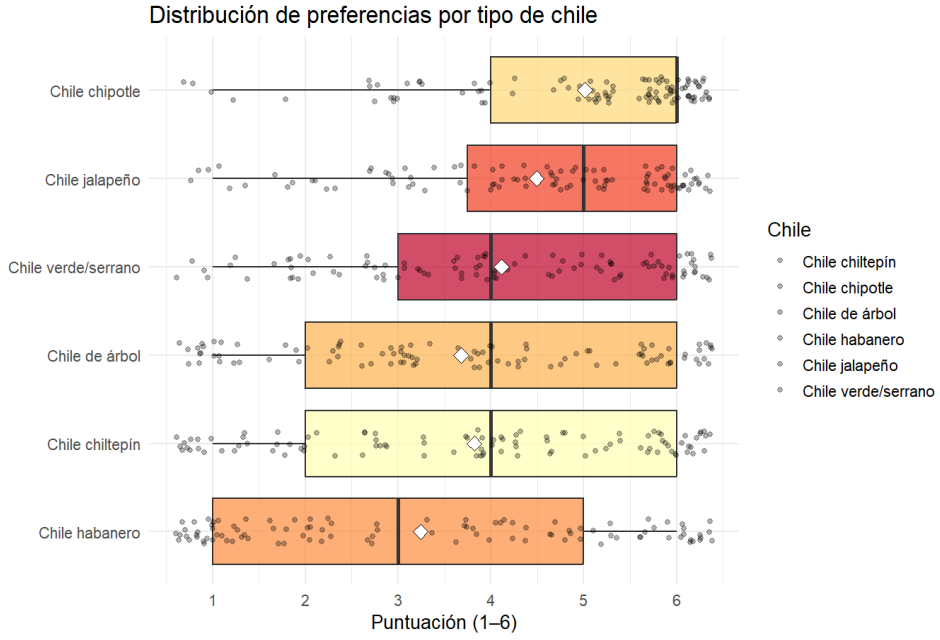


Figura 9. Tipo de chile de mayor aceptación para aderezos.

ASPECTOS COMERCIALES

Un aspecto sobresaliente en la decisión de compra es la revisión de la etiqueta nutrimental del producto, donde el 86% de las mujeres lo revisa, mientras que sólo el 74% para los hombres**,** aunque la diferencia no alcanzó significancia estadística (Fisher, p = 0.175). Así mismo, se observa que para el grupo de edad de 50 a 60 años este aspecto es más relevante (Figura 10).

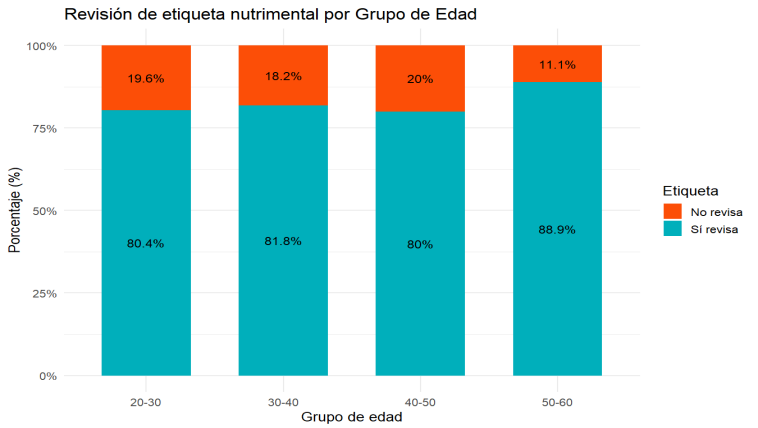


Figura 10. Importancia de revisar la etiqueta nutrimental de un aderezo por grupo de edad.

Por otra parte, los atributos relacionados con la salud, más valorados (del 1 al 5) por los consumidores para decidir en la compra de un aderezo fueron: que contenga conservadores naturales (M = 4.24) > bajo en azúcar (M = 4.09) > bajo en grasa (M = 4.06) > bajo en calorías y sin conservadores (M = 4.04) > bajo en sodio (M = 3.99) y rico en fibra (M = 3.74). Los resultados indican que los consumidores potenciales de aderezos en la localidad encuestada presentan una clara orientación hacia productos más saludables, priorizando la compra de aquellos que no contienen conservadores artificiales y bajo contenido de azúcar y grasa. Este patrón coincide con la tendencia global de “clean label” y preocupación por ingredientes naturales (Asioli et al., 2017; Román et al., 2017). Las mujeres muestran consistentemente mayor interés en la mayoría de los atributos de salud comparado con los hombres. La mayor valoración de atributos saludables por parte de las mujeres es consistente con otros estudios que reportan mayor conciencia nutricional y preocupación por la salud en población femenina (Wardle et al., 2004; Konttinen et al., 2013).

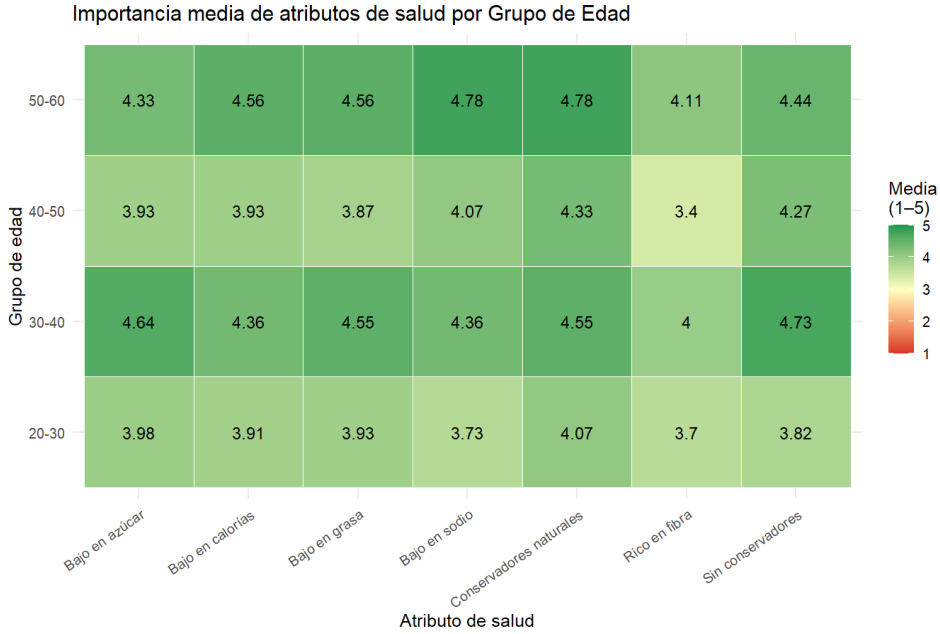


Figura 11. Importancia de los atributos de salud por grupo de edad (media).

El análisis de Kruskal-Wallis identificó diferencias significativas por grupo de edad para la característica “Bajo en sodio” (p = 0.008) y “Sin conservadores” (p = 0.028), sugiriendo que las preocupaciones de salud varían según la etapa vital, el primero para el grupo de 50 a 60 años y el segundo para el grupo de 30 y 40 años (Figura 11). Asimismo, las diferencias por edad sugieren que

los grupos más jóvenes combinan alto consumo con mayor interés en aspectos saludables, representando un segmento estratégico para estos productos.

En la Figura 12 se presenta el Análisis de Componentes Principales (PCA) explicó adecuadamente la varianza (76.1%), revelando que el gráfico mostrado describe adecuadamente la estructura de preferencias de atributos de salud, ya que todos se encuentran al lado positivo de la dimensión 1, esto significa que todos son percibidos como relevantes en la decisión de compra, es decir, se consideran muchos factores simultáneamente al momento de elegir la compra. Observándose dos grupos de atributos principales, que son diferenciados por la dimensión 2, el primer grupo muestra un perfil de consumidor más orientado a la natural y reducción de riesgos, es decir, elige sin conservadores o bien, conservadores naturales y bajo en sodio; esto puede asociarse con la preocupación por la composición y la pureza del producto, así como con Clean label, mínimo procesamiento y la seguridad del producto. El grupo 2 refleja un consumidor más orientado a la nutrición funcional, que elige bajo en calorías, en grasa, en azúcar y rico en fibra, que está relacionado a objetivos nutricionales asociados al control del peso, salud metabólica, funcionalidad o mejor digestión. La relación entre las variables muestra que bajo en calorías, gras y azúcar se perciben con un mismo beneficio. Mientras que fibra se acerca un poco al grupo anterior, pero con identidad de funcionalidad. Sin conservadores es más distintivo dentro del grupo que busca la naturalidad del producto. Finalmente, la mayor contribución la tienen los atributos sin conservadores y bajos en calorías y grasa; los atributos intermedios son bajo en sodio y conservadores naturales y fibra presenta una menor contribución. Los resultados evidencian que los atributos de salud están fuertemente asociados entre sí y se integran en una dimensión principal, lo que sugiere que el consumidor no los evalúa de forma aislada, sino como un conjunto integrado para la salud, validando su uso en estudios de análisis sensorial y consumer insight, esto es, la comprensión profunda del comportamiento del consumidor, que explica por qué actúa o decide de cierta manera.

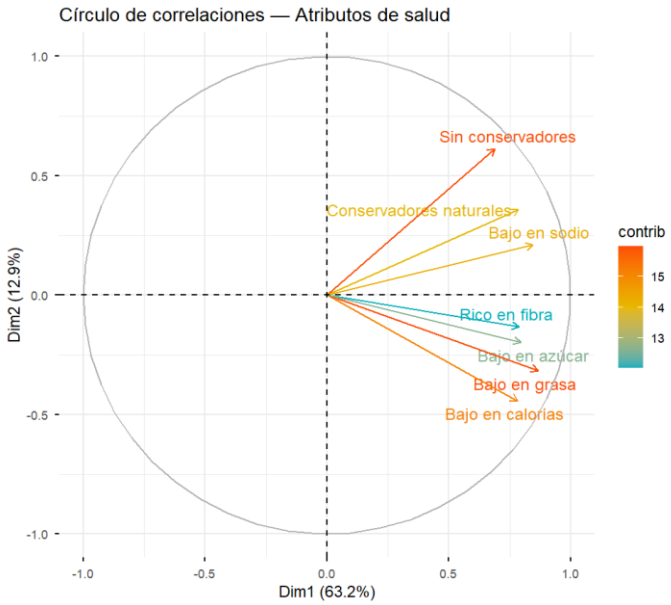


Figura 12. PCA de los atributos de salud que busca un consumidor en un producto saludable.

Finalmente, los supermercados son los puntos de venta de mayor afluencia para la compra de aderezos (75%), mientras que 15% los prepara en casa y 7% los compra en tiendas locales. Además, hubo mayor disposición a pagar entre 50 y 100 pesos por un aderezo de 340 mL (70%), menos de 50 pesos (19%) y entre 100 y 200 pesos (11%).

CONCLUSIONES

La población encuestada es primordialmente estudiantil y femenina, lo que evidencia un grupo particular de posibles consumidores. El sabor agridulce es el perfil dominante en aderezos y se prefieren los aderezos con ingredientes cremosos y vegetales combinados; además los aderezos BBQ y dips son altamente preferidos con un nivel de moderado a alto de picante. Existe una fuerte correlación positiva entre tolerancia al picante y nivel de pungencia deseado. El chile chipotle es el más valorado para aderezos y después el jalapeño, ambos con un sabor bien definido y picor tienen mayor potencial de aceptación, lo que los posiciona como formulaciones clave para el desarrollo de productos saludables y sensorialmente atractivos.

Los atributos de salud fueron fuertemente valorados y las mujeres muestran mayor interés en ellos y en la revisión de etiquetas nutrimentales. Se observaron diferencias significativas por edad en la valoración de atributos como el sodio (adultos 50-60 años) y los conservadores (30 a 40 años), lo que sugiere segmentación de mercado según la etapa de vida.

E consumidor no selecciona los aderezos únicamente por atributos individuales, sino que construye una percepción integral de salud basada en la combinación de características nutricionales y de naturalidad, lo que constituye un *consumer insight* clave para el diseño de productos innovadores. Los resultados apoyan el desarrollo de aderezos con perfiles clean label, bajo en azúcares y grasas, y con conservadores naturales, especialmente dirigidos a mujeres y adultos jóvenes.

Esta encuesta proporciona información valiosa para el desarrollo de nuevos productos en la industria de aderezos, permitiendo alinear las formulaciones con las preferencias reales del consumidor mexicano.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Asioli, J. Aschemann-Witzel, V. Caputo, R. Vecchio, A. Annunziata, T. Næs, P. Varela, “Making sense of the ‘clean label’ trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications”, Food Res. Int., Vol. 99, 2017, pp. 58–71.
2. R. Byarugaba, A. Nabubuya, J. Muyonga, “Descriptive sensory analysis and consumer preferences of bean sauces”, Food Sci. Nutr., Vol. 8, 8, 2020, pp. 4252–4265.
3. N. K. Byrnes, J. E. Hayes, “Personality factors predict spicy food liking and intake”, Food Qual. Prefer., Vol. 52, 2016, pp. 213–221.
4. J. Chen, L. Eaton, Multimodal mechanisms of food creaminess sensation, Food Funct., Vol. 3, 12, 2012, pp. 1265–1274.
5. Functional Food Trends: Global Consumer Insights, Innovamarketinsights.com, revisado el 31 de mayo de 2026. https://www.innovamarketinsights.com/trends/functional-food-trends-global-consumer-insights/
6. M. A. García, M. B. Mateos, L. E. Díaz, A. Duarte, J. G. Peralta, “Alimentos funcionales: Aproximación a una nueva alimentación”, INUTCAM, 2007, pp. 88–93.
7. H. Konttinen, K. Silventoinen, S. Sarlio-Lähteenkorva, S. Männistö, A. Haukkala, “Emotional eating and physical activity self-efficacy as pathways in the association between depressive symptoms and adiposity indicators”, Am. J. Clin. Nutr., Vol. 97, 5, 2013, pp. 1037–1043.
8. H. T. Lawless, C. Hartono, S. Hernandez, “Thresholds and suprathreshold intensity functions for capsaicin in a model food system”, J. Sens. Stud., Vol. 27, 5, 2012, pp. 338–346.
9. A. A. Nolden, J. E. Hayes, “Influence of sensation seeking on response to capsaicin”, Food Qual. Prefer., Vol. 59, 2017, pp. 72–80.
10. B. Piqueras-Fiszman, C. Spence, “Sensory expectations and their influence on consumer acceptance”, in Multisensory Flavor Perception (Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2015), pp. 101–122.
11. A. R. Reza, “Elaboración y caracterización de aderezo a base de mango”, Inv. Des. Cienc. Tecnol. Alimentos, Vol. 1, 2016, pp. 321–326.

12. E. T. Rolls, “Taste, olfactory and food texture reward processing in the brain and the control of appetite”, Proc. Nutr. Soc., Vol. 71, 4, 2011, pp. 488–501.
13. S. Román, L. M. Sánchez-Siles, M. Siegrist, “The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review”, Trends Food Sci. Technol., Vol. 67, 2017, pp. 44–57.
14. C. Talens, S. Alvarez-Sabatel, E. Sanmartín, L. Garcia-Fontanals, P. Talens, “Comprehensive sensory evaluation in low-fat emulsions: A systematic review of diverse food applications”, Food Sci. Nutr., Vol. 13, 1, 2025.
15. Tendencias 2025: consumidores y salud holística marcarán el mercado de alimentos, The Food Tech, revisado el 31 de mayo de 2026. https://thefoodtech.com/packaging-y-procesamiento/tendencias-2025-como-los-consumidores-redefinen-el-concepto-de-salud-y-bienestar/
16. Trends in Sauces and Dressings, Azelis Food & Nutrition, revisado el 31 de mayo de 2026. https://explore.azelis.com/en_GB/tr_fh/trends-in-sauces-and-dressings
17. Voice of the Consumer 2025, PwC España, revisado el 31 de mayo de 2026. https://www.pwc.es/es/retail-consumo/voice-of-the-consumer-survey-2025.html
18. J. Wardle, A. M. Haase, A. Steptoe, M. Nillapun, K. Jonwutiwes, F. Bellisle, “Gender differences in food choice: The contribution of health beliefs and dieting”, Ann. Behav. Med., Vol. 27, 2, 2004, pp. 107–116.

DESARROLLO DE NANOMATERIALES DE ZnO Y ZnO-rGO MEDIANTE SÍNTESIS VERDE CON *Psittacanthus Calyculatus* Y ANÁLISIS DE SU ACTIVIDAD BIOACTIVA

Angela Melisa Cruz-Ramírez[1], José de Jesús Flores-Sierra[1*], Elena Franco-Robles[2], Alexa Estefanía López Martínez[1], Raúl Reyes-Bautista[1], Gustavo Hernández-Mendoza[1]

[1] Tecnológico Nacional de México/ ITS de Purísima del Rincón. [2]Departamento de Veterinaria y Zootecnia, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

*jesus.fs@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

En la actualidad, el desarrollo de métodos sustentables para la síntesis de nanomateriales ha cobrado gran relevancia debido a la necesidad de reducir el uso de reactivos tóxicos y minimizar el impacto ambiental asociado a los procesos químicos convencionales. En este contexto, la síntesis verde surge como una alternativa viable al emplear extractos de origen vegetal que actúan como agentes reductores y estabilizantes naturales. El objetivo del presente estudio fue sintetizar nanopartículas de óxido de zin (ZnO) y un nanocompuesto de óxido de zinc/óxido de grafeno reducido (ZnO-RGO) mediante un enfoque de síntesis verde utilizando extractos acuosos de hojas de *Psittacanthus calyculatus*. También, se evaluaron sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas con la finalidad de explorar su potencial aplicación en diversas áreas [1].

El material vegetal fue recolectado y sometido a un proceso de identificación, seguido de su limpieza, secado y extracción mediante métodos ecoamigables, empleando agua destilada [2]. Posteriormente, los extractos obtenidos se utilizaron en la síntesis de las nanopartículas, controlando parámetros como pH, temperatura y tiempo de reacción, lo que permitió la formación de un precipitado característico asociado a la generación de óxido de zinc. Para la obtención del nanocompuesto, se incorporó óxido de grafeno, favoreciendo su reducción y la interacción con las nanopartículas de ZnO. Los nanomateriales sintetizados fueron secados y empleados en la evaluación de su actividad biológica. La capacidad antioxidante de las nanopartículas y del nanocompuesto se determinó mediante los ensayos DPPH y FRAP, utilizando diferentes concentraciones de las muestras.

Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento dependiente de la concentración, evidenciando la habilidad de los nanomateriales para neutralizar radicales libres y actuar como agentes reductores. En el ensayo DPPH se observó un mayor porcentaje de inhibición a concentraciones bajas, mientras que el método FRAP reveló un incremento progresivo de la capacidad reductora conforme aumentó la concentración de las muestras, lo que sugiere mecanismos antioxidantes complementarios. Por otra parte, la actividad antimicrobiana se evaluó mediante el método de difusión en agar frente a bacterias y hongos de interés, observándose la formación de halos de inhibición cuya magnitud varió en función de la concentración y del tipo de nanomaterial empleado. Estos efectos se atribuyen a las propiedades fisicoquímicas del ZnO y del ZnO–rGO, así como a la posible presencia de compuestos bioactivos provenientes del extracto vegetal.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que *Psittacanthus calyculatus* constituye una fuente viable y eficiente de compuestos reductores para la síntesis verde de nanopartículas de ZnO y del nanocompuesto ZnO–rGO con actividad antioxidante y antimicrobiana. Este enfoque representa una alternativa sustentable y prometedora para el desarrollo de nanomateriales funcionales, con potencial aplicación en áreas como la nanomedicina, la biotecnología y la conservación de alimentos.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo general la síntesis verde de nanopartículas metálicas de ZnO y ZnO-RGO a partir de extractos obtenidos de hojas de *Psittacanthus calyculatus* y la posterior evaluación de sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

En la actualidad, las nanopartículas metálicas han demostrado poseer propiedades fisicoquímicas únicas que difieren de sus contrapartes a mayor escala, lo que les confiere gran potencial en aplicaciones relacionadas con la inhibición del crecimiento microbiano y la neutralización de especies reactivas de oxígeno. Sin embargo, los métodos tradicionales de síntesis frecuentemente emplean reactivos que generan subproductos contaminantes, lo que limita su viabilidad ambiental y económica [3].

Por lo tanto, la síntesis verde ha emergido como una estrategia innovadora y sustentable para la obtención de nanomateriales, al emplear extractos de origen vegetal como agentes reductores y estabilizantes. Este enfoque no solo disminuye el uso de compuestos químicos potencialmente tóxicos y el impacto ambiental asociado a los métodos convencionales, sino que además incorpora biomoléculas con actividad biológica inherente, capaces de conferir propiedades funcionales adicionales a los nanomateriales [4].

El aprovechamiento de *Psittacanthus calyculatus,* la cuál es una planta hemiparásita ampliamente distribuida en México, diversos estudios han demostrado que representa una alternativa de gran interés científico, para la producción sostenible de nanopartículas. Diversos estudios han evidenciado que sus hojas contienen una diversidad de metabolitos secundarios, entre ellos fenoles, flavonoides y taninos, reconocidos por su actividad antioxidante [5].

En la presente investigación se articula la necesidad de desarrollar alternativas ecológicas para la síntesis de nanomateriales con el aprovechamiento de especies vegetales poco estudiadas. La propuesta se fundamenta en la afirmación de que es posible generar conocimiento innovador al mismo tiempo que se promueve la sustentabilidad y el uso responsable de los recursos naturales.

TEORÍA

La síntesis verde de nanopartículas se basa en el uso de compuestos bioactivos presentes en extractos vegetales como agentes reductores y estabilizantes durante la formación de nanomateriales. En el caso de *Psittacanthus calyculatus*, los compuestos fenólicos y flavonoides favorecen la obtención de nanopartículas de ZnO y nanocompuestos ZnO–rGO mediante procesos sostenibles. Estos nanomateriales presentan propiedades antioxidantes y antimicrobianas debido a su elevada área superficial, capacidad de generar especies reactivas de oxígeno e interacción con membranas celulares microbianas.

PARTE EXPERIMENTAL

Recolección e identificación del material biológico
El material vegetal se recolectó en el cerro del Palenque, en Purísima del Rincón, Guanajuato, seleccionando ejemplares de *Psittacanthus calyculatus* en árboles de mezquite (*Prosopis laevigata*). La identificación taxonómica se realizó con base en literatura botánica y referencias morfológicas para asegurar la correcta especie de estudio. El material recolectado fue transportado en bolsas de plástico negras, evitando exposición directa al sol, para conservar sus compuestos bioterapéuticos

Obtención del extracto.
El procedimiento para la obtención del extracto acuoso (EA) consistió en pesar 50 g de cada tipo de material (hoja) y colocarlos en agitación constante con 500 mL de agua destilada estéril durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras se sometieron a centrifugación en una centrífuga de alta velocidad a 3800 rpm por 10 minutos. El sobrenadante fue filtrado al vacío dos veces con papel filtro “Whatman #1”, utilizando una bomba de vacío y un embudo Büchner.

Finalmente, los extractos obtenidos se conservaron a 4°C en oscuridad, asegurando la estabilidad de sus componentes hasta el momento de la síntesis.

Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO)
Para la síntesis verde se preparó una solución 0.1 M de acetato de zinc (II) dihidratado disolviendo 6.585 g del reactivo en 300 mL de agua desionizada. Posteriormente, se añadieron 75 mL del extracto acuoso (EA) de hoja y se mantuvo la mezcla en agitación constante durante 10 minutos. El pH se ajustó a 11 utilizando una solución de NaOH 2M, controlando el proceso con un potenciómetro, utilizando aproximadamente 35ml de la solución preparada. La mezcla se calentó a 80°C durante 2 horas, observándose la formación de un precipitado blanco, indicativo de la generación de nanopartículas de ZnO. El precipitado se separó mediante centrifugación (3800 rpm, 20 min), se lavó 3 veces con agua desionizada a una velocidad de 3800 rpm durante 2 min y 3 veces con etanol absoluto a una velocidad de 3800 rpm durante 2 min, y finalmente se secó en horno a 90°C durante 2 horas. El producto seco se trituró en mortero de porcelana hasta obtener un polvo fino, el cual se almacenó para los ensayos biológicos.

Síntesis de óxido de grafeno reducido
Todo el proceso se llevará a cabo bajo agitación constante, la temperatura se controlará mediante un baño de hielo. Se utilizará grafito sintético (600 mg) con un tamaño de partícula <20 µm para la síntesis. En el paso inicial, se preparará una solución concentrada de H_2SO_4 (98%, 55,5 mL) y HNO_3 (65%, 14,5 mL) y se enfriará por debajo de 10 °C, luego se añadirá el grafito y se mantendrá en agitación durante 30 min. Después, se añadirá $KMnO_4$ (3,6 g) manteniendo la temperatura <20 °C durante 2 h en agitación. Posteriormente, la temperatura se elevará a 40 °C (30 min manteniendo la agitación), luego a 90 °C durante 30 min (AGITACION) inmediatamente, se añadirán 60 mL de agua destilada y se mantendrá la temperatura (90 °C) durante 30 min más. A continuación, la solución se enfrió a temperatura ambiente y se diluirá con 6 mL de H_2O_2 (35%) y 60 mL de agua destilada. La solución se centrifugó, se lavó con agua DI (1 l) y una solución acuosa de HCl 1:10 (1 L) para eliminar los iones metálicos y el ácido restantes, El material obtenido se lavará con una solución de HCl y agua destilada en una proporción 1:10, respectivamente (500 mL), para eliminar posibles metales residuales. Posteriormente, se utilizó TDW (500 mL) para lavar el precipitado por decantación y centrifugación, hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, la muestra se secará a 80 °C durante 3 días. Finalmente, para evitar la aglomeración, el GO se pulverizó en un mortero.

Síntesis del nanocompuesto
Se agregarán 0.5 gr de RGO en 100 ml de agua destilada y se agitarán durante 40 min. 0.25 gr Nanopartículas verdes de ZnO sintetizadas anteriormente se dispersarán en 50 ml de agua destilada y se agitarán por 40 minutos a temperatura ambiente. Ambas soluciones se mezclarán para agitar vigorosamente durante 3 h a temperatura ambiente. Después, la solución se centrifugará y el compuesto obtenido se secará a 100 °C en un horno. Finalmente, las nanopartículas de ZnO-RGO se calcinarán en el horno a una temperatura de 400 °C para obtener el producto final.

Evaluación de la actividad biológica
La actividad antibacteriana y antifúngica del nanomaterial se evaluó mediante el método de difusión en pozo. Se prepararon medios de cultivo, como el agar nutritivo 5.75 g en 250 mL y PDA 9.75 g en 250 mL), esterilizados en una autoclave a 121°C durante 15 minutos. Una vez solidificados en cajas Petri, se inocularon las *cepas Klebsiella sp* y *Fusarium spp*. En el medio de cultivo, se realizaron perforaciones de 5 mm de diámetro, donde se aplicaron las muestras de ZnO verde a concentraciones de 10, 12.5 y 15 mg/mL, disueltas en etanol absoluto. Como controles positivos, se emplearon los antibióticos Cloranfenicol (bacterias) y Cicloheximida (hongos). Tras la incubación, se midieron los aros de inhibición para determinar la efectividad antimicrobiana del nanomaterial.

Evaluación de la actividad antioxidante
Prueba DPPH
Para el análisis, se prepararon soluciones de las nanopartículas de ZnO y del nanocompuesto RGO-ZnO en diferentes concentraciones, incrementando gradualmente desde 25 mg/mL hasta 400 mg/mL. Cada muestra se mezcló con 2 mL de una solución de DPPH a una concentración de 50

µg/mL en etanol absoluto, asegurando una proporción adecuada entre la muestra y el agente radical. Posteriormente, las muestras fueron incubadas a 37°C durante 30 minutos en completa oscuridad, con el fin de evitar la fotodegradación del DPPH y garantizar una reacción uniforme entre los radicales libres y los antioxidantes presentes en el material sintetizado. Durante este periodo, se observó el cambio de color característico del DPPH, que varía de violeta intenso a amarillo pálido conforme se reduce su concentración por efecto antioxidante. Las muestras se analizaron mediante espectrofotometría a una longitud de onda de 517 nm. La medición se realizó por triplicado para cada concentración, asegurando la precisión estadística de los datos. El valor de la capacidad antioxidante (%) se determinó con base en la ecuación:

$$\%\boldsymbol{atratapiento\ DPPH} = [\frac{\boldsymbol{A0 - A1}}{\boldsymbol{A0}}]$$

Donde:
A0= Absorbancia del DPPH en su forma radical (blanco)
A1= Absorbancia de DPPH de las nanopartículas después de 30 min de reacción.

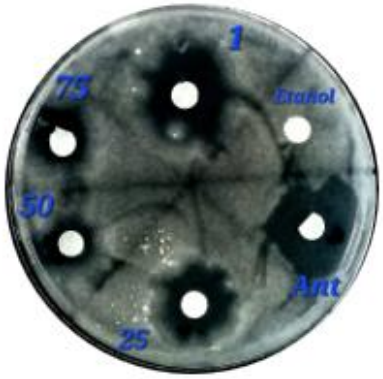
Prueba FRAP
El ensayo FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) se llevó a cabo con el propósito de determinar la capacidad antioxidante de las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y del nanocompuesto ZnO–rGO sintetizados mediante extractos de *Psittacanthus calyculatus*. Se fundamenta en la reducción del ion férrico (Fe^{3+}) a ion ferroso (Fe^{2+}) en presencia del reactivo TPTZ (2,4,6- tri(2-piridil)-1,3,5-triazina), lo que genera un complejo Fe^{2+}–TPTZ de color azul intenso, cuya intensidad es proporcional a la capacidad reductora de la muestra. Para realizar el ensayo, se prepararon soluciones madre de los reactivos principales: TPTZ (10 mM) disuelto en ácido clorhídrico (HCl) 40 mM, cloruro férrico hexahidratado ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$, 20 mM) en agua destilada y un buffer de acetato (0.3 M, pH 3.6) preparado a partir de acetato de sodio y ácido acético 24 glacial. El reactivo FRAP se generó al mezclar las tres soluciones en una proporción 10:1:1 (buffer:TPTZ:$FeCl_3$) y, posteriormente, se tomaron 3 mL del reactivo preparado para mezclarlos con 100 µL de cada muestra de nanopartículas de ZnO o del nanocompuesto ZnO–rGO. Las mezclas se incubaron a 37 °C durante 10 minutos en oscuridad y se midieron a 593 nm utilizando un espectrofotómetro UV, empleando diferentes concentraciones de nanopartículas (0.2, 0.4, 0.8 y 1 mg/mL). Además, se construyó una curva estándar utilizando sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) en un rango de 100 a 2000 µM, expresando los resultados como mmol Fe^{2+}/mg de extracto. Esta metodología permitió evaluar de manera cuantitativa la capacidad reductora de las nanopartículas sintetizadas y comparar la eficiencia antioxidante entre las formulaciones de ZnO y ZnO–RGO.

RESULTADOS

Actividad antimicrobiana frente a *Fusarium* spp.

Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) sintetizadas mediante extractos de hoja (H) de *Psittacanthus calyculatus* mostraron actividad antifúngica frente a *Fusarium* spp., evidenciada por la formación de halos de inhibición (fig. 1). Los resultados indicaron una respuesta dependiente de la concentración, observándose el mayor efecto inhibitorio a la concentración de nanopartículas de 1 mg/mL, con un halo de inhibición de 12.8 mm. Por su parte, las concentraciones de 0.75, 0.50 y 0.25 mg/mL presentaron diámetros de inhibición de 6.4, 3.2 y 4.6 mm, respectivamente. El control positivo (cicloheximida) produjo un halo de inhibición de 8.39 mm, mientras que el control negativo (etanol) no mostró actividad antifúngica. Es importante destacar que la concentración de 1 mg/mL generó un halo superior al observado para el control positivo, lo que sugiere una elevada capacidad inhibitoria de las nanopartículas sintetizadas contra el crecimiento micelial de *Fusarium* spp.

Estos resultados indican que las nanopartículas de ZnO poseen potencial antifúngico significativo, posiblemente asociado a la generación de especies reactivas de oxígeno, alteraciones en la permeabilidad de la membrana celular y daño oxidativo en estructuras celulares del microorganismo.



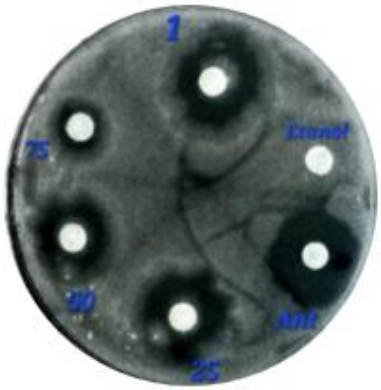
Concentraciones de nanopartículas:
1. 1 mg/mL
75. 0.75 mg/mL
50. 0.50 mg/mL
25. 0.25 mg/mL
Antibiótico cicloheximida
Etanol (control negativo)

Diámetros de inhibición de inhibición:
1. 12.8 mm
75. 6.4 mm
50. 3.2 mm
25. 4.6 mm
Antibiótico. 8.39 mm

Figura 1. Actividad inhibitoria de Fusarium spp. y ZnO de hojas.

La Figura 2 muestra la actividad antifúngica del nanocompuesto ZnO-RGO a partir de extracto de hoja (H) frente a *Fusarium* spp. Los resultados evidenciaron la formación de halos de inhibición alrededor de los discos impregnados con los tratamientos, confirmando la susceptibilidad del microorganismo a los nanomateriales verdes obtenidos. Se observó una variación en la magnitud de los halos de inhibición en función de la concentración empleada y del extracto utilizado durante la síntesis. En general, las concentraciones más elevadas promovieron una mayor inhibición del crecimiento micelial, sugiriendo una relación dosis-dependiente. El control positivo (cicloheximida) mostró una inhibición efectiva del crecimiento fúngico, mientras que el control negativo (etanol agente dispersante no presentó actividad antifúngica significativa.

La actividad observada en los materiales ZnO-RGO puede atribuirse al efecto sinérgico entre las nanopartículas de óxido de zinc y el óxido de grafeno reducido, el cual favorece la interacción con la superficie celular del hongo, incrementa el estrés oxidativo y altera la integridad de la membrana plasmática. Adicionalmente, la presencia de compuestos fenólicos y flavonoides provenientes de los extractos vegetales utilizados en la síntesis podría contribuir al efecto antifúngico observado. Estos resultados sugieren que los nanocompuestos ZnO-RGO poseen un importante potencial como agentes antifúngicos contra *Fusarium* spp., destacando su posible aplicación en el control de fitopatógenos de interés agrícola mediante estrategias más sostenibles y amigables con el medio ambiente.



Concentraciones de nanopartículas:
1. 1 mg/mL
75. 0.75 mg/mL
50. 0.50 mg/mL
25. 0.25 mg/mL
Antibiótico cicloheximida
Etanol (control negativo)

Parámetro de inhibición
1. 7.4mm
75. 2mm
50. 4.3mm
25. 4.8mm
Antibiótico. 7.68mm

Figura 2. Actividad inhibitoria de Fusarium spp. y ZnO-RGO de hojas

Actividad antimicrobiana frente a *Klebsiella* sp.

La evaluación de la actividad antibacteriana frente a la bacteria *Klebsiella* sp. mostró que las nanopartículas de ZnO a partir de extracto de hoja, fueron capaces de inhibir el crecimiento bacteriano en todas las concentraciones evaluadas. El control positivo (cloranfenicol) presentó un halo de inhibición de 8.6 mm.

Entre las concentraciones analizadas, la mayor actividad inhibitoria se observó a 7.5 mg/mL, con un halo de 4.2 mm, seguida de las concentraciones de 2 mg/mL (4.0 mm), 10 mg/mL (3.6 mm), 5 mg/mL (2.6 mm) y 2.5 mg/mL (2.3 mm) (fig. 3). Aunque los halos obtenidos fueron inferiores al control antibiótico, los resultados demuestran que las nanopartículas ZnO verdes presentan actividad bacteriostática frente a esta bacteria Gram negativa.

De manera complementaria, las formulaciones ZnO-RGO (fig. 4) también exhibieron actividad antimicrobiana, registrándose halos de inhibición de 7.4 mm, 2.0 mm, 4.3 mm y 4.8 mm para las concentraciones de 1.0, 0.75, 0.50 y 0.25 mg/mL, respectivamente. Estos resultados sugieren que la incorporación de óxido de grafeno reducido podría favorecer la interacción nanopartícula-microorganismo y contribuir a la inhibición del crecimiento bacteriano.



Concentraciones

1. **Antibiótico cloranfenicol**

Concentraciones de nanopartículas (ZnO):

2. 10 mg/ml
3. 7.5 mg/ml
4. 5 mg/ml
5. 2.5 mg/ml
6. 2 mg/ml
7. **Nanopartículas ZnO**

8.Etanol (control negativo)

Diámetro de inhibición

1. 8.6 mm
2. 3.6 mm
3. 4.2 mm
4. 2.6 mm
5. 2.3 mm
6. 4 mm

Figura 3. Actividad inhibitoria de Klebsiella sp. y ZnO de hojas



Concentraciones

1. Antibiótico cloranfenicol

Concentraciones de nanopartículas (ZnO-RGO):

2. 10 mg/ml
3. 7.5 mg/ml
4. 5 mg/ml
5. 2.5 mg/ml
6. 2 mg/ml
7. **Nanopartículas ZnO**

8.Etanol (control negativo)

Diámetro de inhibición

1. 2.3 mm
2. 2.3 mm
3. 3.2 mm
4. 2.6 mm
5. 3.5 mm
6. 3.0

Figura 4. Actividad inhibitoria de Klebsiella sp. y ZnO-RGO de hojas

Actividad antioxidante mediante el ensayo DPPH

La capacidad antioxidante de las nanopartículas de ZnO fue evaluada mediante el ensayo de atrapamiento del radical libre DPPH. Los resultados obtenidos evidenciaron que las muestras poseen capacidad para neutralizar radicales libres, lo que indica la presencia de compuestos bioactivos adsorbidos sobre la superficie de las nanopartículas provenientes del extracto de hoja de *Psittacanthus calyculatus*.

La actividad antioxidante observada puede atribuirse principalmente a compuestos fenólicos, flavonoides y otros metabolitos secundarios que permanecen asociados a las nanopartículas después del proceso de síntesis verde. Estos compuestos son capaces de donar electrones al radical DPPH, reduciendo su estabilidad y disminuyendo su absorbancia.

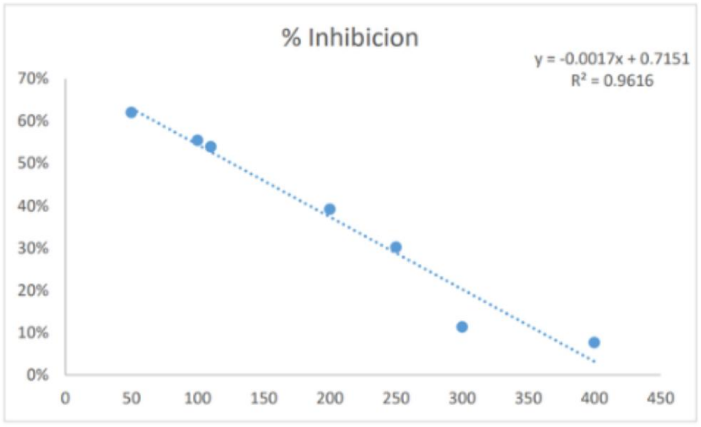


Figura 5. Actividad antioxidante de ZnO mediante ensayo *DPPH*

Capacidad reductora determinada mediante ensayo FRAP

Los resultados mostraron que las nanopartículas de ZnO de hoja de *Psittacanthus calyculatus* presentaron capacidad para reducir iones férricos (Fe^{+3}) a su forma ferrosa (Fe^{+2}), evidenciando un comportamiento antioxidante complementario al observado mediante el ensayo DPPH.
La actividad reductora observada sugiere que las nanopartículas sintetizadas conservan biomoléculas con propiedades redox provenientes del extracto de hoja, lo que podría incrementar su potencial biológico y favorecer futuras aplicaciones en áreas biomédicas, farmacéuticas y agrobiotecnologícas.

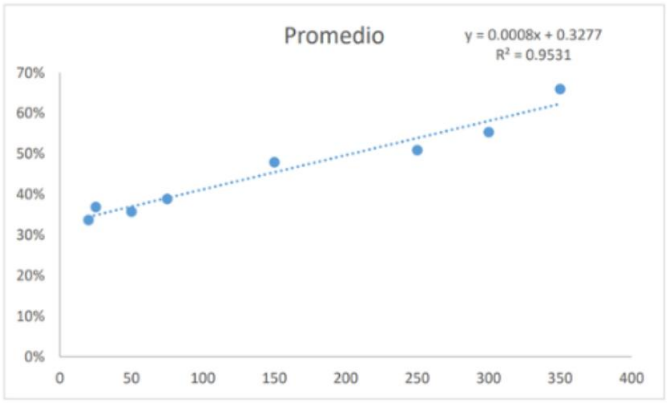


Figura 6. Capacidad reductora determinada mediante *FRAP*

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de las propiedades intrínsecas del ZnO y los metabolitos bioactivos provenientes de los extractos de Psittacanthus calyculatus contribuyen a la actividad biológica observada. En conjunto, estos hallazgos demuestran el potencial de los nanomateriales sintetizados como agentes antimicrobianos y antioxidantes, además de confirmar que la síntesis verde constituye una alternativa sostenible para el desarrollo de materiales con aplicaciones biotecnológicas, agrícolas y biomédicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mushtaq, W., Ishtiaq, M., Maqbool, M., Mazhar, M. W., Casini, R., Abd-ElGawad, A. M., & Elansary, H. O. (2023). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Viscum album Extracts: Unveiling Bioactive Compounds, Antibacterial Potential, and Antioxidant Activities. Plants, 12(11), 2130. https://doi.org/10.3390/plants12112130
2. Perumal, D., Albert, E. L., & Abdullah, C. A. C. (2022). Green Reduction of Graphene Oxide Involving Extracts of Plants from Different Taxonomy Groups. Journal Of Composites Science, 6(2), 58. https://doi.org/10.3390/jcs6020058
3. Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. Journal Of Drug Delivery Science And Technology, 53, 101174. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174
4. S. Iravani, “Green synthesis of metal nanoparticles using plants”, *Green Chemistry*, Vol. 13, No. 10, 2011, pp. 2638–2650. http://dx.doi.org/10.1039/c1gc15386b
5. J. J. Flores-Sierra, D. Sánchez-Guevara, L. A. Xoca-Orozco, G. Hernández-Mendoza y R. Reyes-Bautista, “Análisis fitoquímico de extracto de hojas y flores de *Psittacanthus calyculatus* ubicado en el cerro del Palenque de Purísima del Rincón, Guanajuato”, Rev. Bio Ciencias, Vol. 11, 2024, e1572. https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1572
6. Rodríguez-Cruz, M., Pérez-Ordaz, L., Serrato-Barajas, B., Juárez-Oropeza, M., Mascher, D., & Paredes-Carbajal, M. (2003). Endothelium-dependent effects of the ethanolic extract of the mistletoe Psittacanthus calyculatus on the vasomotor responses of rat aortic rings. Journal Of Ethnopharmacology, 86(2-3), 213-218. https://doi.org/10.1016/s0378-8741(03)00073-4

APROVECHAMIENTO DE SUERO DE LECHE FRESCO PARA LA MEJORA NUTRICIONAL Y SENSORIAL DE PRODUCTOS DE PANADERÍA

Giovanna Rossi-Márquez, Cristian Aarón Dávalos Saucedo, Luis Fernando De la Cruz-Torres, Sergio Rodríguez Miranda

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Lagos de Moreno, Jalisco
giovanna.rossi@lagos.tecmm.edu.mx

RESUMEN

La región de los Altos de Jalisco se caracteriza por su elevada producción lechera, lo que conlleva la generación de grandes volúmenes de suero de leche, un subproducto que conserva proteínas, lactosa y minerales de alto valor nutricional. No obstante, su disposición inadecuada representa un problema ambiental significativo debido a su elevada carga orgánica, contribuyendo a la contaminación de cuerpos de agua locales. Debido a lo anterior, el aprovechamiento del suero en el desarrollo de alimentos se plantea como una alternativa sustentable que permita reciclar residuos o subproductos de la industria de los alimentos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la incorporación de suero fresco como sustituto total del componente líquido en la formulación de panes tipo bollo, analizando su impacto en las propiedades nutricionales y la aceptación sensorial del producto final. Para ello, se elaboraron dos formulaciones: una receta control preparada con leche y una receta experimental utilizando suero fresco proveniente de la elaboración de queso. Se realizaron análisis bromatológicos para determinar el contenido de proteína cruda mediante el método Dumas, grasa conforme al método AOAC (1998) y humedad. Adicionalmente, se llevó a cabo una evaluación sensorial con jueces semi-entrenados, empleando pruebas de escala Likert y de preferencia apareada. Los resultados mostraron que el pan formulado con suero presentó un incremento significativo en el contenido de proteína cruda (10.11%) en comparación con el pan control (7.01%), así como una reducción en el contenido de grasa. En cuanto a la evaluación sensorial, ambas formulaciones obtuvieron niveles adecuados de aceptación; sin embargo, en la prueba de preferencia ciega, el pan con suero fue elegido por el 80% de los evaluadores. En conclusión, la incorporación de suero fresco en productos de panadería representa una alternativa tecnológica viable que permite valorizar un subproducto de la industria láctea, reducir su impacto ambiental y desarrollar alimentos de bajo costo con mejor perfil nutricional, lo que le confiere un alto potencial de aplicación en programas de nutrición social y desarrollo regional.

INTRODUCCIÓN

La producción de queso genera grandes volúmenes de suero de leche. De manera general, por cada 10 L de leche destinados a la elaboración de queso se obtienen aproximadamente 9 L de suero, equivalentes a cerca del 90 % del volumen inicial. Este subproducto conserva compuestos hidrosolubles de interés tecnológico y nutricional, entre ellos lactosa, proteínas, minerales y vitaminas [1-4]. El suero de leche puede clasificarse como dulce o ácido de acuerdo con el proceso de obtención y el pH. Su composición depende del origen de la leche y del tipo de queso elaborado; sin embargo, su fracción proteica es de interés por su calidad nutricional y por sus propiedades tecnofuncionales en sistemas alimentarios [2,4]. Además de proteínas solubles, contiene lactosa y sales minerales que pueden influir en la estructura, coloración y percepción sensorial de productos horneados.

La disposición directa del suero sin tratamiento representa un problema ambiental por su elevada carga orgánica. El documento fuente reporta demanda bioquímica de oxígeno superior a 35,000 ppm y demanda química de oxígeno superior a 60,000 ppm, valores asociados con un alto potencial

contaminante en cuerpos de agua [3, 5-8]. En regiones con actividad lechera y quesera, su valorización como ingrediente alimentario constituye una alternativa técnica para reducir residuos y aprovechar sólidos lácteos con valor funcional.

Aunque el suero se ha utilizado en diferentes matrices alimentarias, la literatura citada se concentra principalmente en suero en polvo, concentrados o derivados procesados. El uso de suero fresco como sustituto directo de la fase líquida en panificación requiere verificar simultáneamente su efecto sobre la composición proximal, la aceptación sensorial y la viabilidad tecnológica del producto horneado. Al sustituir líquidos en panadería, es fundamental analizar cómo cambian la composición y la textura del pan. El suero fresco puede modificar el aporte de sólidos, el balance de humedad y la interacción de proteínas y carbohidratos durante el horneado. Por ello, la pertinencia del presente estudio no radica solo en el aprovechamiento de un subproducto, sino en determinar si su incorporación mantiene la aceptabilidad del pan y mejora parámetros proximales cuantificables.En este estudio se evaluó dicho efecto en bollos de panadería mediante comparación con una formulación control.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formulación

Se aplicó un diseño comparativo con dos tratamientos. La formulación control incluyó harina de trigo, polvo para hornear, extracto de vainilla, sal, huevo, mantequilla, leche y azúcar. La formulación experimental sustituyó la leche por suero fresco de leche de vaca, manteniendo las mismas proporciones de los demás ingredientes. Ambas formulaciones se hornearon a 180 °C durante 30 min.

Análisis químico y sensorial

La caracterización bromatológica incluyó proteína cruda por combustión de Dumas, grasa cruda por método AOAC 1998 y humedad por método AOAC 950.46. Se registró el pH del suero fresco y del agua purificada empleada como referencia. La evaluación sensorial se realizó con jueces semi-entrenados mediante escala hedónica tipo Likert (Tabla 1) y prueba de comparación pareada ciega entre la formulación control y la formulación con suero.

Tabla 1. Escala empleada para el análisis sensorial

Parámetro	Escala
Me encantó	10
Me gustó	7
Indiferente	5
No me gustó	3
Lo odié	0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH del suero fresco fue 6.5 ± 0.2, mientras que el agua purificada registró 6.7 ± 0.2. Estos valores indican que el suero empleado no presentó acidez marcada bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, debido a que no se reportó el pH de la leche utilizada en la formulación control, la interpretación debe limitarse a señalar que el suero fresco no introdujo una diferencia ácido-base evidente respecto a la referencia acuosa. Este punto es relevante porque variaciones de pH pueden modificar el desarrollo de gluten, la retención de gas, la coloración y la textura del producto horneado.

La sustitución de leche por suero fresco incrementó la proteína cruda de 7.01 ± 1.24 a 10.11 ± 2.03 %, equivalente a un aumento absoluto de 3.10 puntos porcentuales y un incremento relativo aproximado de 44.2 %. Este resultado es coherente con la incorporación de proteínas solubles del

suero. La grasa cruda disminuyó de 11.5 ± 0.05 a 9.19 ± 0.08 %, lo que representa una reducción relativa cercana a 20.1 % (Tabla 2).

Tabla 2. composición proximal de los panes

Parámetro	Pan control	Pan con suero
Proteína cruda (%)	7.01 ± 1.24	10.11 ± 2.03
Grasa cruda (%)	11.5 ± 0.05	9.19 ± 0.08
Contenido de agua (%)	27.31 ± 0.68	26.64 ± 1.14

La humedad final permaneció en valores próximos entre tratamientos: 27.31 ± 0.68 % en el control y 26.64 ± 1.14 % en el pan con suero, con diferencia absoluta de 0.67 puntos porcentuales. Esta diferencia es menor que la desviación estándar del tratamiento con suero, por lo que no sugiere una modificación marcada de la retención global de agua durante el horneado. Es importante recordar que la funcionalidad de ingredientes lácteos en panificación depende de su composición e interacción con la harina; fracciones de suero y caseína pueden afectar absorción de agua, fermentación, volumen, firmeza y envejecimiento del pan [9].

En la escala hedónica no se registraron respuestas de rechazo para ninguna formulación. El control concentró 100 % de respuestas positivas, mientras que el pan con suero acumuló 83 % de respuestas positivas y 17 % de respuestas indiferentes (Tabla 3). Esta distribución indica que la sustitución por suero no generó rechazo sensorial detectable en el panel.

Tabla 3. Respuesta sensorial y preferencia ciega

Tratamiento	Me encantó	Me gustó	Indiferente	Preferencia ciega
Pan control	42 %	58 %	0 %	20 %
Pan con suero	33 %	50 %	17 %	80 %

Por su parte, el pan formulado con suero de leche acumuló un 83% de respuestas positivas (50% "Me gustó" y 33% "Me encantó") y un 17% de respuestas en la categoría "Indiferente". Esta distribución estadística indica que la incorporación de suero fresco modificó de forma sutil las propiedades organolépticas del producto, desplazando un pequeño porcentaje de la preferencia hacia la neutralidad, pero sin generar un rechazo sensorial detectable o estadísticamente significativo en el panel.

Es fundamental contrastar este comportamiento con los resultados obtenidos en la posterior prueba ciega de comparación apareada (fig. 1). Aunque el análisis individual de la escala hedónica podría sugerir una ligera ventaja para la receta tradicional debido al porcentaje de indiferencia en la muestra con suero, el experimento de preferencia ciego, donde las muestras se identificaron únicamente con códigos numéricos, demostró de manera contundente que el 79% de los evaluadores seleccionó mayoritariamente el pan elaborado con suero sobre el 21% que prefirió el control. La preferencia por el pan con suero se explica por una mayor presencia de lactosa y proteínas, que favorecen las reacciones de Maillard y la caramelización. Esto no solo mejora el perfil nutricional, sino que genera aromas y colores más atractivos que el pan tradicional. Por lo tanto, la presencia de un 17% de respuestas indiferentes en la prueba monádica inicial no representa una desventaja competitiva, sino una variación en la familiaridad del perfil sensorial que, al ser evaluada en un entorno de elección directa y a ciegas, se traduce en una ventaja hedónica notable y en una clara intención de consumo.

Así mismo, la diferencia entre ambos ensayos puede explicarse porque la escala hedónica estima el grado de agrado de cada muestra, mientras que la prueba pareada obliga al juez a elegir entre dos alternativas bajo condiciones equivalentes y puede detectar preferencias leves aun cuando ambas formulaciones sean aceptables [10].

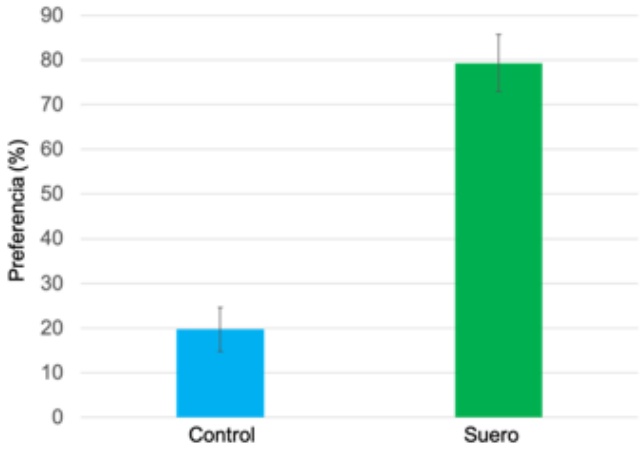


Figura 1. Resultados del análisis ciego de preferencia del producto.

CONCLUSIONES

El uso de suero fresco de leche como sustituto líquido de la leche en bollos de panadería fue viable bajo las condiciones ensayadas. La formulación con suero presentó mayor proteína cruda, menor grasa cruda, humedad comparable y aceptación sensorial favorable. Los resultados respaldan el potencial del suero fresco como ingrediente líquido para formular productos horneados con mejora proximal y aprovechamiento de un subproducto lácteo regional. La eventual transferencia tecnológica debe considerar también inocuidad, trazabilidad y condiciones de manejo del suero desde su generación hasta su incorporación en la formulación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades del Tecnológico Mario Molina, Unidad Académica Lagos de Moreno, por permitir el uso de las instalaciones para el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Dairy Processing Handbook*, Tetra Pak Processing Systems, 2003.
2. J. B. Królczyk, T. Dawidziuk, E. Janiszewska-Turak, and B. Sołowiej, “Use of whey and whey preparations in the food industry: A review”, *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, Vol. 66, 3, 2016, pp. 157-165.
3. D. E. Valencia and M. L. Ramírez-Castillo, “La industria de la leche y la contaminación del agua”, *Elementos*, Vol. 73, 2009, pp. 27-31.
4. S. Anand, M. Chenchaiah, and K. Som Nath, “Whey and whey products”, in *Human Nutrition: Production, Composition and Health*, Y. W. Park and G. F. W. Haenlein, Eds. (John Wiley & Sons, Oxford, U.K., 2013).
5. R. Božanić, I. Barukčić, K. L. Jakopović, and L. Tratnik, “Possibilities of whey utilisation”, *Austin J. Nutr. Food Sci.*, Vol. 2, 7, 2014, p. 1036.
6. P. Jelen, “Utilization of whey products. Whey processing”, in *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Academic Press, 2011).
7. R. Prazeres, F. Carvalho, and J. Rivas, “Cheese whey management: A review”, *J. Environ. Manage.*, Vol. 110, 2012, pp. 48-68.
8. B. Munaza, S. G. M. Prasad, and B. Gayas, “Whey protein concentrate enriched biscuits”, *Int. J. Sci. Res. Publ.*, Vol. 2, 2012, pp. 1-4.
9. N. Erdogdu-Arnoczky, Z. Czuchajowska, and Y. Pomeranz, "Functionality of whey and casein in fermentation and in breadbaking by fixed and optimized procedures," Cereal Chem., 73(3), pp. 309-316, 1996.

10. H. T. Lawless and H. Heymann, Sensory Evaluation of Food: Principles and Practices, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2010, doi: 10.1007/978-1-4419-6488-5.

BIOSÍNTESIS VERDE Y EVALUACIÓN ANTIMICROBIANA DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA OBTENIDAS A PARTIR DE EXTRACTO DE *Chlorella Vulgaris*

Melissa Gomez Velazquez, Karelia Liliana Rangel Ruiz, Jorge Alberto Granados Olvera y Eddy Salatiel Viornery Calderón

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli.
1323232010@upci.edu.mx

RESUMEN

La resistencia microbiana constituye uno de los principales retos para la salud pública contemporánea, al reducir la eficacia de los tratamientos convencionales y estimular la búsqueda de alternativas terapéuticas innovadoras. En este marco, la nanotecnología verde se posiciona como una estrategia prometedora al emplear recursos biológicos para la síntesis de nanomateriales con propiedades antimicrobianas.

El presente estudio aborda la biosíntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) utilizando extracto de *Chlorella vulgaris*, microalga rica en metabolitos bioactivos capaces de actuar como agentes reductores y estabilizantes naturales. Este enfoque permite obtener nanomateriales de manera sustentable, evitando el uso de reactivos químicos tóxicos y favoreciendo procesos compatibles con aplicaciones biomédicas.

Las AgNPs obtenidas fueron caracterizadas mediante espectroscopía UV-Vis, confirmando la formación de plasmones superficiales; difracción de rayos X (DRX), que evidenció su estructura cristalina; y dispersión dinámica de luz (DLS), que mostró una distribución homogénea de tamaño y buena estabilidad coloidal. La evaluación antimicrobiana reveló actividad significativa frente a bacterias Gram negativas, con resultados superiores a los controles convencionales.

Estos hallazgos confirman la eficacia de las AgNPs biosintetizadas y su capacidad para integrarse en estrategias innovadoras contra la resistencia microbiana. En conjunto, los resultados demuestran la viabilidad de las AgNPs obtenidas con *C. vulgaris* como agentes antimicrobianos sustentables y potencialmente aplicables en biomedicina, consolidando la relevancia de la nanotecnología verde como herramienta estratégica para el futuro de la salud.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la resistencia microbiana ha tomado relevancia en el mundo ya que estos microorganismos están siendo resistentes a los tratamientos convencionales, de esta forma se buscan nuevos métodos innovadores que ayuden a combatir este problema. De esta forma, la nanotecnología verde nace como una alternativa viable y sostenible para sintetizar nanomateriales con propiedades antimicrobianas.

Siendo así, la síntesis de nanopartículas de plata con extracto de *C. vulgaris* ha demostrado ser una prometedora alternativa para el problema de la resistencia microbiana. De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, la síntesis de las nanopartículas de plata sin el uso de algún reactivo contaminante es viable y sostenible a largo plazo (Robles Jarero, et. al, 2024)

TEORÍA

La biosíntesis de AgNPs mediante extracto de *C. vulgaris* se fundamenta en la capacidad reductora y estabilizante de los metabolitos presentes en la microalga, tales como proteínas, polisacáridos, pigmentos y compuestos fenólicos. Estos compuestos actúan como agentes biológicos capaces de

transformar los iones de plata (Ag^+) provenientes del nitrato de plata ($AgNO_3$) en plata metálica (Ag^0), dando lugar a nanopartículas estables y funcionales (Angulo Espinoza y Santos Ballardo, 2024).

El proceso inicia con la reducción de los iones de plata, donde los grupos funcionales de los metabolitos (–OH, $–NH_2$, –COOH) transfieren electrones a los iones metálicos, promoviendo su conversión a plata elemental. Esta reacción ocurre bajo condiciones de calentamiento moderado (50–60 °C), que favorecen la cinética de reducción y la formación de núcleos metálicos. Una vez generados los primeros átomos de plata, se produce la nucleación, etapa en la que los átomos se agrupan para formar núcleos estables. Posteriormente, las nanopartículas crecen mediante la agregación controlada de nuevos átomos de plata, mientras los metabolitos del extracto se adsorben sobre su superficie, actuando como agentes estabilizantes. Este recubrimiento biológico evita la aglomeración excesiva y confiere estabilidad coloidal al sistema, además de modificar ligeramente las propiedades ópticas y estructurales de las partículas (López Arellanes, 2022)

Durante la reacción, el cambio de color de la solución de incolora a amarillenta o marrón, constituye una evidencia visual de la formación de nanopartículas, asociado al fenómeno de resonancia plasmónica superficial. Este efecto se confirma mediante espectroscopía UV-Vis, donde aparece un pico característico entre 400 y 500 nm. La estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) observada por difracción de rayos X (DRX) y la distribución de tamaños determinada por dispersión dinámica de luz (DLS) corroboran la formación exitosa de AgNPs con propiedades ópticas y coloidales adecuadas (Díaz Acosta, 2019).

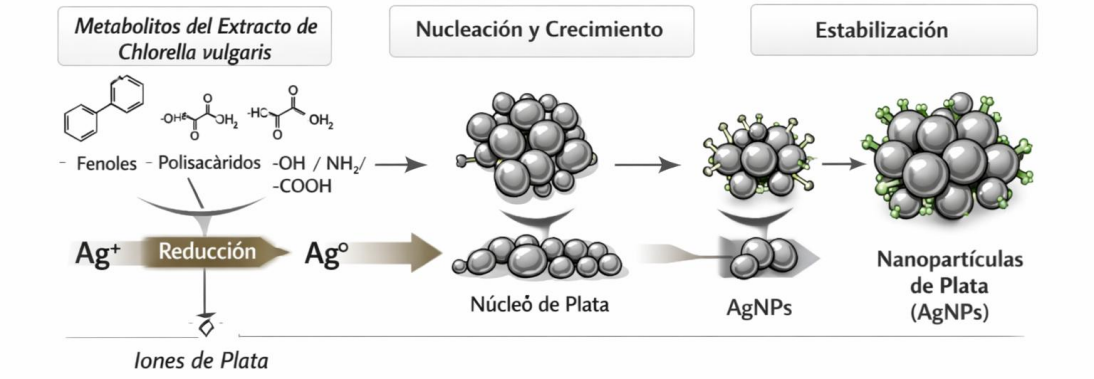


Diagrama 1: Mecanismo de Reacción: Biosíntesis de AgNP´s con C. vulgaris. Generado con Copilot (Microsoft, 2026) con el prompt "Generar un diagrama que ejemplifique el mecanismo de reacción de la biosíntesis de nanopartículas de plata con extracto de C. vulgaris" [Imagen generada con IA]

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación del extracto de *Chlorella vulgaris*

La microalga *C. vulgaris* fue cultivada bajo las siguientes condiciones: pH de 6.5 a 7, temperatura de 28 a 30°C, oxigenación constante y luz artificial durante 2 meses. Posteriormente, la biomasa generada a partir del alga se sometió a un proceso de secado con luz infrarroja por 24 h, seguido de una pulverización con mortero hasta obtener un polvo fino con la finalidad de facilitar la extracción de metabolitos. El material seco se trató mediante destilación con 200 mL de etanol, realizando cinco ciclos consecutivos, con el objetivo de obtener un extracto rico en compuestos bioactivos con capacidad reductora y estabilizante (Mongue Oroz, 2009). En el diagrama 2 se puede observar este proceso.



Diagrama 2: Metodología para la extracción de Chlorella vulgaris. Fuente propia, 2026

Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)

Se preparó una solución acuosa de nitrato de plata ($AgNO_3$) a 1mM. A esta solución se adicionaron 10 gotas del extracto de *C. vulgaris* cada 5 minutos durante un periodo de 65 minutos, manteniendo la mezcla a una temperatura constante de 50–60 °C. Este procedimiento permitió la reducción de los iones de plata y la formación de nanopartículas, estabilizadas por los metabolitos presentes en el extracto. El cambio de color de la solución fue considerado un indicador visual de la formación de AgNPs. Este procedimiento se esquematiza en el Diagrama 3. Una vez obtenidas, las AgNPs fueron caracterizadas mediante DRX, DLS y espectroscopia UV-VIS. (Albis Arrieta et. al, 2021)



Diagrama 3: Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) con extracto de Chlorella vulgaris. Fuente propia, 2026.

PRUEBAS DE SENSIBILIDAD

La evaluación de la actividad antimicrobiana de las nanopartículas de plata (AgNPs) biosintetizadas con extracto de *C. vulgaris* se realizó mediante una prueba de sensibilidad en agar Muller Hinton, utilizando una tira con gradiente de concentración (0, 20, 40, 60 µL). Este método permitió determinar la capacidad de las nanopartículas para inhibir el crecimiento bacteriano.

Para las pruebas realizadas se emplearon cepas bacterianas Gram negativas, *Escherichia coli y Salmonella typhimurium*. Las cepas se cultivaron en agar nutritivo durante 24 horas a 37°C. Una vez preparado el medio, se distribuyó uniformemente la cepa bacteriana y se colocó la tira previamente impregnada. Las cajas se incubaron a 37°C durante 48h. Transcurrido el periodo de incubación, se procedió a la observación de las zonas de inhibición formadas a lo largo de la tira.

Este método proporciona una evaluación precisa y reproducible de la actividad antimicrobiana de las AgNPs, permitiendo establecer una correlación directa entre la concentración aplicada y el grado de inhibición bacteriana. Además, la prueba con tira de gradiente constituye una herramienta eficaz para validar la potencia biocida de las nanopartículas obtenidas mediante síntesis verde, (González Ortiz, *et. al.*, 2021). reforzando su potencial aplicación en sistemas antimicrobianos sostenibles. En el Diagrama 4 se representa este proceso.



Diagrama 4: Pruebas de sensibilidad Antimicrobiana con Tira de Gradiente de Concentración. Fuente propia, 2026

RESULTADOS

Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X se empleó para determinar la estructura cristalina y el tamaño de las AgNPs biosintetizadas. El difractograma (Diagrama 5) mostró picos definidos en 2θ ≈ 38°, 44°, 64° y 77°, correspondientes a los planos (111), (200), (220) y (311) de la fase cúbica centrada en las caras (FCC) de la plata metálica (JCPDS 04-0783). La alta intensidad en el plano (111) evidenció una nucleación preferencial, mientras que el cálculo mediante la ecuación de Scherrer permitió estimar tamaños promedio de 16–30 nm. Esta técnica confirma la formación de nanopartículas cristalinas y valida su naturaleza metálica, aspecto esencial para aplicaciones biomédicas y catalíticas (González Ortiz et al., 2021).

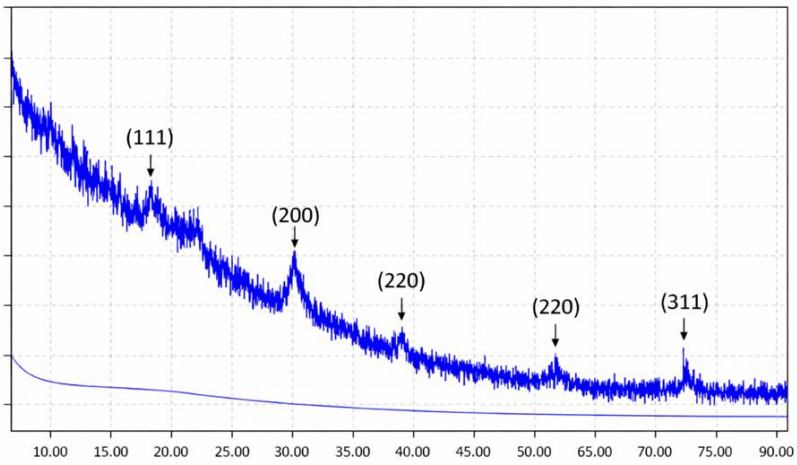


Diagrama 5: DRX de las AgNPS. Fuente propia, 2026

Dispersión Dinámica de Luz (DLS)

El análisis DLS se utilizó para evaluar la distribución de tamaños y el comportamiento coloidal de las AgNPs en suspensión. Los resultados mostraron una distribución bimodal (Diagrama 6), con un primer pico alrededor de 50 nm correspondiente a nanopartículas individuales bien dispersas y un segundo cercano a 1000 nm asociado a agregados estabilizados por los metabolitos de *C. vulgaris.* Esta coexistencia refleja la polidispersidad del sistema, donde las fracciones nanométricas aportan alta área superficial y actividad biocida, mientras que las fracciones micrométricas confieren estabilidad coloidal. La técnica es clave para comprender el desempeño real de las nanopartículas en medios líquidos.

.

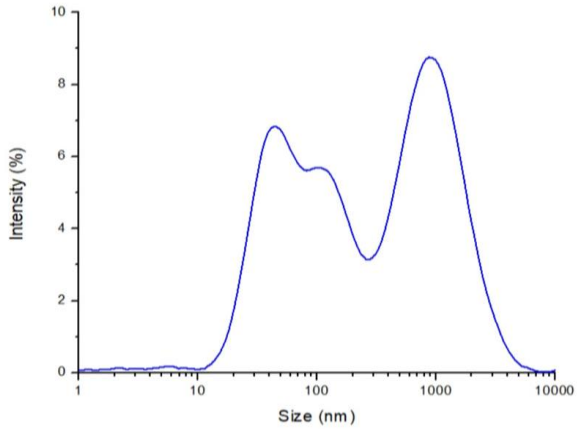


Diagrama 6: DLS de las AgNPs. Fuente propia, 2026

Espectroscopía UV-Vis

La espectroscopía UV-Vis se aplicó para confirmar la formación de plasmones superficiales característicos de las AgNPs. El espectro reveló un pico intenso en la región de 400–500 nm (Diagrama 7), asociado a la resonancia plasmónica superficial de las nanopartículas de plata, mientras que la disminución hacia 700 nm reflejó la absorción de compuestos orgánicos presentes en el extracto de *C. vulgaris.* Este análisis constituye una evidencia rápida y no destructiva de la síntesis de AgNPs, además de aportar información sobre su estabilidad óptica y su interacción con metabolitos biológicos.

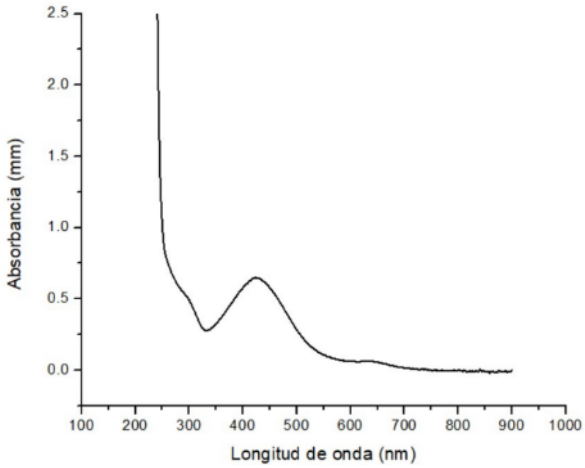


Diagrama 7: Espectroscopía UV-Vis de las AgNPs. Fuente propia, 2026

.

Prueba de sensibilidad

En el Diagrama 8, se muestra la prueba de sensibilidad de *E. coli* con las AgNP´s. donde se observa que a lo largo de toda la tira se encuentra la presencia de un halo de inhibición de 0.7 cm, indicando que *E.coli* es sensible a las AgNP´s

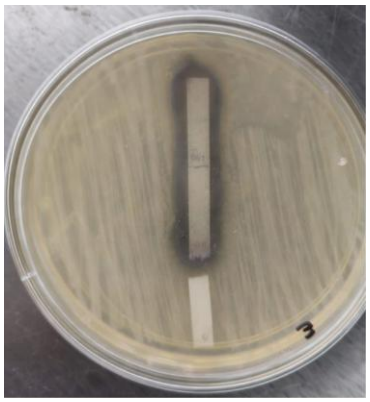


Diagrama 8: Prueba de sensibilidad de E. coli. Fuente propia, 2026

Para las pruebas de sensibilidad de *S. typhimurium* (Diagrama 9), se observa un halo inhibitorio de aproximadamente 0.8 cm, lo que indica que la cepa es sensible a las AgNP´s.

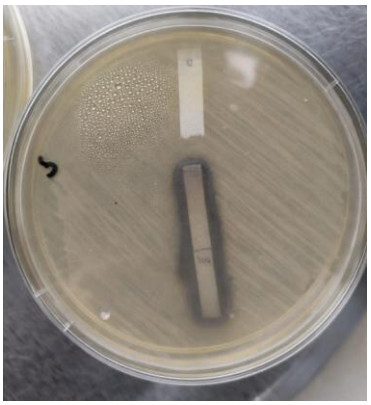


Diagrama 9: Prueba de sensibilidad de S. typhimurium. Fuente propia, 2026

CONCLUSIONES

La biosíntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) mediante extracto de *C. vulgaris* demostró ser un método sustentable, eficiente y con gran potencial en aplicaciones biomédicas. Los análisis de caracterización (UV-Vis, DRX y DLS) confirmaron la formación de nanopartículas cristalinas, estables y con propiedades ópticas adecuadas, mientras que las pruebas de sensibilidad evidenciaron una notable actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram negativas como *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium*. Estos resultados validan la capacidad de los metabolitos de la microalga para actuar como agentes reductores y estabilizantes naturales, eliminando la necesidad de reactivos tóxicos y favoreciendo procesos compatibles con la nanotecnología verde. En conjunto, el estudio no solo reafirma la viabilidad de las AgNPs como alternativa frente a la resistencia microbiana, sino que también abre la posibilidad de explorar su integración en

tratamientos innovadores y sostenibles, consolidando a la biosíntesis verde como una herramienta estratégica para el futuro de la salud pública y la medicina moderna.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albis Arrieta, A. R., Gonzalez Ortiz, F. A., & Torrenegra Escorcia, D. (2021). Biosíntesis de nanopartículas de plata con *Chlorella sp.* Revista ION, 34(2), 7–15. https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021001
2. Angulo Espinoza, P. J. ., & Santos Ballardo, D. D. U. (2024). Síntesis verde de nanopartículas de plata (AgNPs) con biomasa de la microalga *Nannochloropsis oculata*. QUIBIOUAS Revista De Ciencias Químico Biológicas, 1, 8-14. https://revistas.uas.edu.mx/index.php/QBU/article/view/447
3. Díaz Acosta, Edgar Manuel. (2019). Nanopartículas de plata: síntesis y funcionalización. Una breve revisión. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 12(22)Epub 15 de junio de 2020. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.60758
4. Gonzalez Ortiz, F. A., Torrenegra Escorcia, D., & Albis Arrieta, A. R. (2021). Biosíntesis de nanopartículas de plata con *Chlorella sp*.. Revista ION, 34(2), 7-15. Epub July 27, 2021. https://doi.org/10.18273/revion.v34n2-2021001
5. López Arellanes, M. E. (2022). Nanoformulados de extractos de *Chlorella vulgaris* en nanopartículas poliméricas para su aplicación agrícola en el control de *Fusarium sp*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Tomado de: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://eprints.uanl.mx/23422/1/1080080927.pdf&ved=2ahUKEwi7uvLonPCUAxVilWoFHa9FJwwQFnoECCEQAQ&usg=AOvVaw1RctfYpCvxYzPt4JFxofDX .
6. Microsoft, 2026. Copilot. Mecanismo de Reacción: Biosíntesis de AgNP´s con C. vulgaris. con el prompt “Generar un diagrama que ejemplifique el mecanismo de reacción de la biosíntesis de nanopartículas de plata con extracto de *C. vulgaris*” [Imagen generada con IA] https://copilot.microsoft.com
7. Mongue Oroz, M. (2009). Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. Anales de Química de la RSEQ, (1), 33–41. Tomado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2931286
8. Robles-Jarero, E.G., Gálvez-Gastélum, F.J., Velásquez-Ordoñez, C., Ojeda-Martínez, M.L., & Yáñez-Sánchez, I. (2024). AgNPs break the wall cell in Chlorella vulgaris by oxidative stress generation. Revista Bio Ciencias. DOI:10.15741/revbio.11.e1649

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DEL NURITE (*Clinopodium Macrostemum*) EN EXTRACTOS OBTENIDOS MEDIANTE ULTRASONIDO

Carlos Zahid Nieto Sánchez[1], Rafael Zamora Vega[1], Lorena Martínez Alcantar[2], José Octavio Rodiles López[1], Mario Lenin Molinero Cárdenas[1]

[1] Facultad de Químico Farmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
[2]. Instituto de Investigaciones Químico Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
1706112b@umich.mx

RESUMEN

Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son un subproducto que desempeña diversas funciones dentro del metabolismo. Una sobreproducción de ROS que supere al sistema de defensa antioxidante provoca estrés oxidativo (EO), en donde existe daño celular. Este estado de constante estrés está presente en patologías donde se afecta la funcionalidad celular, y se contribuye al desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas. Los antioxidantes ayudan a regular el estado EO ya que contienen compuestos como polifenoles y flavonoides, que pueden incrementar nuestra defensa antioxidante. Dentro de estos antioxidantes, tenemos los llamados antioxidantes exógenos, los cuales se encuentran en frutas, verduras, y algunas plantas como lo es el nurite (Clinopodium macrostemum) que al ser endémica de México, es utilizada en la comunidad de Paracho de Verduzco, Michoacán, a manera de infusión para tratar diversos trastornos gastrointestinales y mejorar la digestión, ya que su composición incluye diversos compuestos como ácido siríngico, ácido gálico, catequina y quercetina, los cuales le confieren actividad antioxidante. El nurite se recolectó en el Cerro del Águila, en Paracho de Verduzco, Michoacán. Para obtener lo compuestos bioactivos se realizó la extracción asistida por ultrasonido (SONICS Vibra Cell VCX750) realizada a partir de la hoja y tallo a una frecuencia de 35Hz. Se utilizó una mezcla 1:10 en solución hidroalcohólica a 30, 60 y 90% de etanol, además de distintos parámetros de tiempo (5, 10 y 15 minutos) y temperaturas (15, 30 y 45 °C). Posteriormente se realizó una cuantificación de compuestos fenólicos por el método Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965), y flavonoides por el método de $AlCl_3$ (Christ & Müller, 1960). Además de evaluar su capacidad antioxidante mediante los métodos DPPH (Brand & Berset, 1995) y FRAP (Benzie & Strain, 1996). Los resultados mostraron que tanto hoja como tallo presentaron buena concentración de compuestos fenólicos (194.25 ± 3.85 mgEq Ac.Gálico / g para hoja y 342.48 ± 3.91 mgEq Ac.Gálico / g para tallo) y flavonoides (25.68 ± 0.08 mgEq Quercetina / g para hoja y 34.39 ± 0.75 mgEq Quercetina / g para tallo) principalmente a mayor concentración de etanol (90%), bajas temperaturas (15°C) y tiempos de 10 minutos. Para el caso de la capacidad antioxidante el tallo presentó los mejores resultados en menor concentración de etanol (30%) a tiempos de 5 minutos y temperatura de 30°C (0.0203 ± 0.0027 IC50 mg/mL para DPPH y 0.0130 ± 0.0003 EC50 mg/mL en FRAP), mientras que la hoja a mayor concentración de etanol (90%) a tiempos de 5 minutos y temperatura de 30°C (0.0338 ± 0.0002 IC50 mg/mL para DPPH y 0.0267 ± 0.0010 EC50 mg/mL en FRAP). Todos los extractos obtenidos mediante ultrasonido presentaron mejores valores con respecto a la literatura reportada para maceración. De entre los que destacamos los extractos obtenidos a mayor concentración de etanol (90%), principalmente de tallo que mostraron mayor cantidad de fenoles totales y flavonoides, al igual que mayor capacidad antioxidante en comparación a todos los extractos de hoja.

INTRODUCCIÓN

Dentro del organismo existen moléculas químicamente reactivas que tienen la capacidad de reaccionar. Sin embargo, Las especies reactivas regulan una amplia variedad de procesos fisiológicos celulares incluyendo la proliferación, la diferenciación y la apoptosis (Carvajal 2019; Rodríguez *et al*, 2019). Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son un subproducto del

metabolismo normal del oxígeno y desempeñan un papel importante en la señalización celular y la homeostasis. Un desequilibrio entre la producción de ROS y el sistema de defensa antioxidante celular provoca estrés oxidativo (Rigoulet *et al*, 2011).

Las mitocondrias son la fuente primaria de producción de ROS y el objetivo principal de sus efectos dañinos (Vizi & Chinopoulos, 2006). Durante el funcionamiento de la cadena respiratoria mitocondrial se lleva a cabo la reducción tetravalente de O_2 a agua (H_2O), los electrones son donados por NADH, sin embargo, se puede llevar a cabo la reducción univalente del O_2 (Abundis *et al*, 2005). Una proporción de las moléculas de O_2 (1–3%) captadas por las células se convierten en radicales de anión superóxido (O_2•−) por los complejos I y III. Este radical puede desviarse posteriormente a peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y al radical hidroxilo (OH•). Estas especies oxidativas se consideran subproductos metabólicos normales (Vizi & Chinopoulos, 2006; Rigoulet, *et a*l, 2011; Marchi *et a*l, 2013). Las mitocondrias las generan continuamente y se mantienen bajo control mediante mecanismos antioxidantes celulares endógenos, como la superóxido dismutasa (que convierte rápidamente el superóxido en H_2O_2 y O_2), la catalasa, la glutatión peroxidasa y las peroxirredoxinas distribuidas por toda la célula. (Vizi & Chinopoulos, 2006; Rigoulet, *et a*l, 2011; Marchi *et al*, 2013).

El estrés oxidativo representa un desequilibrio entre la producción de ROS y el sistema de defensa antioxidante celular (Marchi *et al*, 2013) en donde el número de agentes oxidativos supera la capacidad de los sistemas biológicos para equilibrar de forma autónoma los oxidantes y antioxidantes (Mejía *et al*, 2021). En condiciones de estrés, los niveles de ROS aumentan y, debido a su alta reactividad, lo que causa daño celular, necrosis y la apoptosis mediante la oxidación de lípidos, proteínas y ADN además de provocar disfunción endotelial, infiltración y activación de células inflamatorias (Guija y Guija, 2023)

Este estado está presente en patologías donde se afecta la funcionalidad celular, y se contribuye al desarrollo de enfermedades crónico-degenerativas como diabetes, obesidad, hipertensión arterial, síndrome metabólico, cáncer, aterosclerosis, enfermedades circulatorias y cardiovasculares, además de trastornos neurológicos y neurodegenerativos como Parkinson y Alzheimer (Valencia *et al*, 2017; Mejía *et al*, 2021; Dorantes *et al*, 2023; Guija y Guija, 2023). Es por eso que los antioxidantes tienen cuatro funciones principales, las cuales son disminuir la concentración de oxidantes; unirse a iones metálicos para evitar la formación de especies reactivas; transformar los peróxidos en productos menos reactivos y detener la propagación y el aumento de radicales libres (Espinosa *et al*, 2019)

Los antioxidantes se han clasificado en 2 principales sistemas de defensa, el cual es el sistema de defensa enzimático, el cual actúa por varios mecanismos, bloqueando la producción de radicales libres, eliminación de oxidantes, conversión de radicales libres en productos menos tóxicos, bloqueo de metabolitos y mediadores de inflamación, bloqueando la cadena de propagación de oxidantes secundarios, reparación de moléculas dañadas, estimulación del sistema antioxidante endógeno (Flores, 2021); Y el sistema de defensa no enzimático que está constituido por una diversidad de antioxidantes como el glutatión (GSH), y la ingesta de antioxidantes exógenos, los cuales pueden incrementar la defensa antioxidantepor medio de ingesta de compuestos que el cuerpo humano no puede producir por sí mismo, obtenidos de frutas y verduras, alimentos ricos en antioxidantes. Este grupo incluye a los polifenoles, carotenoides, algunas vitaminas y elementos traza (Gutiérrez & Justo 2002).

Los compuestos fenólicos son compuestos orgánicos que se encuentran de manera natural en los vegetales y son caracterizados por poseer anillos aromáticos con uno o varios grupos fenólicos con un efecto relacionado con la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles como cáncer, diabetes mellitus, hipertensión arterial y obesidad (Guija y Guija, 2023; Rudrapal *et al*, 2024). Por otro lado, los flavonoides constituyen una subclase ampliamente estudiada dentro del grupo de los polifenoles. cuyo estudio ha recibido preferencial atención. Su estructura química fundamental se caracteriza por un esqueleto de tres anillos y pueden dividirse en seis grandes subgrupos: flavonoles, flavanonas, flavonas, flavanoles e isoflavonas (An *et al*, 2025; Guiance *et a*l, 2019).

Todos estos compuestos los encontramos en diversas plantas, tal es el caso de *Clinopodium macrostemum*, el cual su taxonomía fue tratada con considerable detalle por McVaugh & Schmid (1967). Reconociendo dos taxones infraespecíficos dentro de su estructura: una *var. macrostemum*, relativamente restringida, y una *var. laevigatum*, muy extendida. Señalando que la *var. macrostemum* típica estaba restringida a la zona del centro-sur de México, ambas variedades ocasionalmente crecen juntas o cerca una de la otra, y debido a la distribución casi completamente alopátrica de los extremos glabros (sin vello) y pubescentes, se supuso que evolucionaron por separado, hasta el punto de que pueden ser reconocidas como variedades de una sola "especie" (Turner 2008).

Esta planta fue tratada durante mucho tiempo como miembro del gran género Satureja. Ademas asi como Melissa macrostema Moc. & Sessé ex Benth., Calamintha macrostema (Moc. & Sessé ex Benth.) Benth., y Satureja macrostema (Moc. & Sessé ex Benth.) este último englobando a más especies parecidas (Olivos *et al*, 2018; Turner 2008).

El nurite es una planta medicinal mexicana apreciada por el agradable aroma de sus hojas, conocida comúnmente como "poleo" considera un cultivo importante para las comunidades en las Tierras Bajas del Sur de Oaxaca, México. Este arbusto se utiliza principalmente como aromatizante y aromatizante para alimentos y se comercializa en mercados locales (Villa *et al*, 2015).

Tabla1. Clasificación taxonómica de *Clinopodium macrostemum*

Categoría Taxonómica	**Clasificación**
Reino	*Plantae*
Clado	*Traqueofitas, Angiospermas, Eudicotiledóneas, Astéridas*
Orden	*Lamiales*
Familia	*Lamiaceae*
Género	*Clinopodium L.*
Especie	*Clinopodium macrostemum (Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze*
Nombre Binomial	*Clinopodium macrostemum*
Autoridad	*(Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze*

En México, los usos tradicionales se remontan a la época prehispánica. A mediados del siglo XVI, se reportó varios usos medicinales de esta planta entre los nativos mexicanos como infusiones de hojas frescas para diversos trastornos gastrointestinales, tos y para promover la digestión (Rojas *et al*, 2018). Las infusiones mentoladas preparadas a partir de sus hojas se utilizan en la medicina tradicional para tratar problemas gastrointestinales, resacas e infecciones dermatológicas, dadas las propiedades antioxidantes, hepatoprotectoras y nefroprotectoras de sus aislados (Gutiérrez *et al*, 2010).

La gente local reporta que las hojas secas se utilizan para preparar infusiones acuosas como remedio contra el dolor de estómago y diarrea; Las propiedades aromáticas son apreciadas por el aroma agradable de frescura aprovechando esta propiedad para conferirle propiedades organolépticas particulares a platillos y bebidas tradicionales, como frijoles y destilados artesanales de agave (Rojas *et al*, 2018).

Pérez *et al*, 2024 también menciona que se consume la infusión de la parte aérea de la planta o macerando en aguardiente (alcohol de caña) o mezcal para su consumo como bebida alcohólica. En

su uso medicinal alivia el dolor de estómago, la diarrea, la acidez estomacal, la fiebre, los síntomas de exceso de consumo de alcohol y la presión arterial alta.

Zornoza, 2025 menciona que en *Clinopodium macrostemum* se han encontrado diversos compuestos bioactivos como ácido siríngico, ácido gálico, y ácido cafeico, y flavonoides como catequina, quercetina y rutina, los cuales le confieren actividad antioxidante medidas en IC50 expresada en mg/mL para extractos obtenidos de hoja en agua-metanol de 0.095 ± 0.008 para DPPH y 0.038 ± 0.0002 FRAP, mientras que para el tallo de 0.079 ± 0.007 DPPH y 0.044 ± 0.0003 FRAP. Tambien existen estudios que muestran que los contenidos de polifenoles y flavonoides en Clinopodium oscilan entre 30.1 y 39.5 mg GAE/g y entre 6.3 y 96.1 mg QE/CE/g (Pérez *et al*, 2024). Para la correcta obtención de estos compuestos bioactivos presentes en vegetales es necesaria una correcta elección del solvente y del método de extracción. En el empleo de solventes es importante considerar su polaridad, ya que estos tienen efectos de relación estructura-propiedad afectando o favoreciendo la longitud del enlace, polaridad, distribución de electrones, momentos dipolares y parámetros espectroscópicos, lo que tiene efecto directo en las interacciones inter e intramoleculares y por ende su actividad (Zheng *et al*, 2017).

Las técnicas de extracción se clasifican en convencionales: Que requieren el uso de solventes asociados con el empleo de calor y agitación, así como tiempos prolongados como lo es el caso de la maceración, el cual es un proceso de extracción sólido-líquido colocando la muestra seca en contacto con el disolvente orgánico, donde componentes solubles del sólido serán extraídos y disueltos en el solvente (Sierra *et al*, 2018; Flores, 2017); Y técnicas modernas o no convencionales, que minimizan o eliminan el uso de solventes orgánicos, mejorando el rendimiento y acortando el tiempo de extracción, tal es el caso de la extracción asistida por ultrasonido, el cual se basa en el fenómeno de cavitación, propagando una onda de presión acústica, la cual consiste en compresiones en el medio de transmisión, y se lleva a cabo a lo largo de la dirección de propagación. Cuando se aplica una gran presión negativa a un líquido, las fuerzas intermoleculares de Van der Waals no son lo suficientemente fuertes como para mantener la cohesión y se forman pequeñas cavidades o microburbujas llenas de gas. Estas microburbujas sufren deformaciones antes de colapsarse de manera adiabática, con un volumen tan pequeño que la energía del colapso se entrega a un número relativamente pequeño de moléculas, generando una ruptura de la pared celular permitiendo la permeabilidad del tejido de las plantas dando entrada del solvente al material (Ramón & Garzón, 2021; Azuola & Vargas, 2007).

TEORÍA

Los extractos de *Clinopodium macrostemum* obtenidos mediante ultrasonido contendrán más compuestos fenólicos y mayor capacidad antioxidante en comparación a extractos obtenidos mediante maceración.

PARTE EXPERIMENTAL

El material biológico se recolectó en el Cerro del Águila en Paracho de Verduzco, Michoacán, México y se identificó en el Herbario de la Facultad de Biología en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (EBUM). Para evitar que el material biológico se contaminara por, se secó a la sombra por el método de colgado tradicional durante 15 días a temperatura ambiente, separando hojas y tallos (CIAD, 2021) para posteriormente ser molido y tamizado por malla del 50. Para la obtención de los extractos se utilizó tanto las hojas como el tallo para ser sometió al ultrasonido (SONICS Vibra Cell VCX 750) en una proporción 1:10 materia sólida-solvente en concentraciones de 30, 60 y 90% de etanol-agua, con una frecuencia de 35Hz, a tiempos de 5, 10, y 15 minutos y temperaturas de 15, 30 y 45 °C.

Para la determinación del contenido de compuestos fenólicos totales se tomó 100µL de las muestras a analizar. Se añadió también 100µL del reactivo de Folin Ciocalteu (1:9 Fc-H2O). Se agitó y se dejó reposar 2 minutos, para añadir 2000µL de una solución acuosa de Na_2CO_3 al 2%, se mezcló

vigorosamente, y se dejó reposar 30 min a temperatura ambiente en completa obscuridad, para tomar lectura a 750 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Genesys 10 UV). Usando ácido gálico como estándar (0.1 a 1 mg/mL) (Pripdeevech *et al*, 2010).

Para la determinación del contenido del contenido de flavonoides totales se tomó 1000µL del extracto a analizar, se le añadió 1000µL de metanol al 50% para llegar al volumen de 2000µL en las muestras. Por último, se añadió 500µL de AlCl3 al 2% en metanol, se agitó la mezcla y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 30 min en completa obscuridad, después se determinó la absorbancia a 415 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Genesys 10UV). Se utilizó Quercetina como estándar (0.03 a 0.5 mg/mL) (Chang *et al*, 2002).

Para medir la capacidad antioxidante mediante DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo) se siguió la metodología de Karamác *et al*. (2005) con algunas modificaciones. Tomando 50µL de extracto, se le añadió 50µL de dimetil sulfóxido para llegar al volumen de 100µL en las muestras. Se preparó el reactivo DPPH al 1 mM en metanol. La reacción se realizó adicionando la alícuota del extracto y 1.9mL de la solución DPPH. Posteriormente la mezcla reposó por 30 minutos a total oscuridad y se tomó lectura a 515 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Genesys 10UV). Se utilizó Trolox como estándar (25 a 1000 µM/mL).

Para medir la capacidad antioxidante mediante el método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) Se siguió la metodología de Thaipong *et al*. (2006). La solución FRAP está compuesta de una solución de 2,4,6- Tris(2-piridil)-s-triazina, TPTZ a 10 mM; FeCl3 a 20mM; y acetato de sodio a 300 mM con un pH de 3.6 con relación 1:1:10. Se tomó Se tomó 50µL del extracto a analizar adicionando 900µL de dimetil sulfóxido, para tomar una alícuota. Posteriormente, se adicionaron 1.5mL de la solución FRAP y se dejó reposar 20 minutos en completa oscuridad para llevarse a cabo la reacción y tomar lectura a 593 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Genesys 10UV). Se utilizó Trolox como estándar (25 a 500 µM/mL). Para la IC50 se reportó el valor de la concentración que se obtuvo al obtener el 0.5 de absorbancia.

RESULTADOS

De entre los extractos obtenidos podemos destacar los 3 mejores de tallo y hoja.

Tabla 2. Cuantificación de fenoles y flavonoides totales.

PARTE VEGETAL	CONDICIONES			COMP. FENÓLICOS	COMP. FLAVONOIDES
	ETANOL	TEMPERATURA	TIEMPO	MG EAG/GR	MG EQQ/GR
TALLO	60%	15 °C	10 MIN.	342.5 ± 3.9 ^{A}	34.4 ± 0.8 ^{A}
TALLO	90%	45 °C	10 MIN.	339.1 ± 3.5 ^{A}	33.2 ± 0.1 ^{A}
TALLO	90%	30 °C	5 MIN.	295.6 ± 3.9 ^{B}	29.8 ± 0.2 ^{B}
HOJA	90%	30 °C	5 MIN.	194.2 ± 3.9 ^{C}	22.7 ± 0.5 ^{D}
HOJA	60%	30 °C	10 MIN.	186.6 ± 4.1 ^{CD}	14.0 ± 0.1 ^{E}
HOJA	60%	15 °C	10 MIN.	185.4 ± 5.0 ^{D}	25.7 ± 0.1 ^{C}

Los extractos de tallo presentaron mayor cantidad de compuestos fenólicos totales en comparación de los de hoja, sin embargo, todos son muy buenos resultados en comparación con lo descrito por Zornoza, 2025, reportando valores de 102.58 ± 0.36 para hoja, y 85.90 ± 0.47 en extracto hidroalcohólicos extraídos por maceración. Para los resultados de flavonoides se presentan valores

similares para extractos de hoja y tallo, destacando los extractos de tallo presentaron una mayor cantidad de flavonoides, y, sin embargo, todos estos resultados también son mejores a los reportados por Zornoza, 2025, reportando valores de 102.58 ± 0.36 para hoja, y 85.90 ± 0.47 en extracto hidroalcohólicos extraídos por maceración.

La extracción por ultrasonido ofrece mayor rendimiento en comparación a maceración, esto puede ocurrir por diversos motivos como lo es la mejora de la biodisponibilidad de los compuestos, y la reducción del peso molecular de los polifenoles y polisacáridos asociados (Yuan, *et al*, 2025). De igual manera, la combinación de efectos térmicos locales, cavitación mecánica y vibración molecular acelera la ruptura de los enlaces éster que unen a los ácidos fenólicos con las cadenas de carbohidratos (Lv, *et al*, 2025).

Tabla 3. Capacidad antioxidante DPPH y FRAP

PARTE VEGETAL	CONDICIONES			DPPH	FRAP
	ETANOL	TEMPERATURA	TIEMPO	%IC50 TROLOX mg/mL	%EC50 TROLOX mg/mL
TALLO	60%	15 °C	10 min.	0.0269 ± 0.0004 [a]	0.0245 ± 0.0001 [b]
TALLO	90%	45 °C	10 min.	0.0269 ± 0.0003 [a]	0.0238 ± 0.0004 [a]
TALLO	90%	30 °C	5 min.	0.0276 ± 0.0016 [a]	0.0270 ± 0.0016 [d]
HOJA	90%	30 °C	5 min.	0.0338 ± 0.0002 [b]	0.0276 ± 0.0003 [d]
HOJA	60%	30 °C	10 min.	0.0570 ± 0.0004 [d]	0.0293 ± 0.0001 [e]
HOJA	60%	15 °C	10 min.	0.0469 ± 0.0016 [c]	0.0267 ± 0.0010 [c]

La combinación de efectos térmicos locales, cavitación mecánica y vibración molecular acelera la ruptura de los enlaces éster que unen a los ácidos fenólicos con las cadenas de carbohidratos, ya que un porcentaje significativo de los compuestos fenólicos de las plantas no se encuentra libre en el citoplasma, sino que está unido covalentemente a los componentes de la pared celular y la fibra dietética (celulosa, lignina y proteínas estructurales) mediante enlaces éster o éter (Lv, *et al*, 2025). Además, una de las formas más profundas en que el ultrasonido afecta a los flavonoides es facilitando la transición de formas glicosiladas a agliconas. En la naturaleza, la mayoría de los flavonoides se encuentran unidos a restos de azúcares mediante enlaces (C-O) glicosídicos, lo que aumenta su solubilidad en agua, pero a menudo reduce su actividad biológica directa (Yuan, *et al*, 2025).

Otro mecanismo fundamental es la reducción del peso molecular de los polifenoles y polisacáridos asociados, las ondas ultrasónicas de alta energía pueden fragmentar polímeros grandes en unidades más pequeñas que son más fácilmente absorbidas por el epitelio intestinal (Cao, *et al*, 2023; Demesa, *et al*, 2024).

La biodisponibilidad también depende de la estabilidad de los compuestos frente al pH ácido del estómago y las condiciones alcalinas del intestino delgado. El procesamiento por ultrasonido puede inducir la formación de complejos proteína-polifenol más estables que protegen a los bioactivos durante su paso por el tracto digestivo (Cao, *et al*, 2023).

Para la capacidad antioxidante podemos observar que en general los extractos de tallo poseen una mayor inhibición del radical DPPH en comparación a los extractos de hoja. Esto coincide con lo descrito por Zornoza, 2025 que reporto valores de 0.095 ± 0.008 para hoja y 0.079 ± 0.007 para tallo en sus extractos hidroalcohólicos extraídos por maceración.

De igual manera para la capacidad antioxidante podemos observar que los extractos de tallo poseen una mayor inhibición en comparación a los extractos de hoja, sin embargo, ambos presentan buenos

resultados en comparación con lo descrito por Zornoza, 2025 que reporto valores de 0.038 ± 0.0002 para hoja y 0.044 ± 0.0003 para tallo en sus extractos hidroalcohólicos extraídos por maceración.

CONCLUSIONES

Todos los extractos obtenidos por ultrasonido presentaron un mejor rendimiento y capacidad antioxidante en comparación a lo descrito por la literatura para extractos extraídos por maceración. Destacando los extractos de tallo, los cuales presentaron una mayor cantidad de fenoles y flavonoides totales en comparación a los extractos de hoja, así como una mayor capacidad antioxidante para DPPH y FRAP.

BIBLIOGRAFÍA

1. Carvajal Carvajal, Carlos. (2019). Especies reactivas del oxígeno: formación, funcion y estrés oxidativo. Medicina Legal de Costa Rica, 36(1), 91-100. Retrieved July 08, 2025, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152019000100091&lng=en&tlng=es.
2. Rodríguez, N. C., LOPEZ, Y. I. C., & Chaverri, J. P. (2019). El óxido nítrico y las especies reactivas de nitrógeno: aspectos básicos e importancia biológica. http://repositorio.pediatria.gob.mx:8180/bitstream/20.500.12103/3060/1/art-invest2006-06.pdf
3. Rigoulet, M., Yoboue, E. D., & Devin, A. (2011). Mitochondrial ROS generation and its regulation: mechanisms involved in H2O2 signaling. Antioxidants & redox signaling, 14(3), 459-468. https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/ars.2010.3363
4. Adam-Vizi, V., & Chinopoulos, C. (2006). Bioenergetics and the formation of mitochondrial reactive oxygen species. Trends in pharmacological sciences, 27(12), 639-645. https://www.cell.com/trends/pharmacological-sciences/abstract/S0165-6147(06)00249-5
5. Abundis, E. M., Rodríguez, M. A. S., & Bentlakder, M. E. H. (2005). Participación de la mitocondria en el desarrollo de estrés oxidativo en la obesidad. Bioquimia, 30(3), 82-89. https://www.redalyc.org/pdf/576/57630304.pdf
6. De Marchi, E., Baldassari, F., Bononi, A., Wieckowski, M. R., & Pinton, P. (2013). Oxidative stress in cardiovascular diseases and obesity: role of p66Shc and protein kinase C. Oxidative medicine and cellular longevity, 2013(1), 564961. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3625561/
7. Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., Velázquez-Ovalle, G. y Vázquez-Ovando, A. (2021). Capacidad anti-oxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, 9 (1), 9-33. https://doi.org/10.23850/24220582.4023
8. Guija-Guerra, H. y Guija-Poma, E. (2023). Radicales libres y sistema antioxidante. Horiz Med (Lima), 23(2): e2158. https://doi.org/10.24265/horizmed.2023.v23n2.12
9. Valencia-Avilés, E., Ignacio-Figueroa, I., Sosa-Martínez, E., Bartolomé-Camacho, M. C., Martínez-Flores, H. E. y García-Pérez, M. E. (2017). Polifenoles: propiedades antioxidantes y toxicológicas. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, (16), 15-29. https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1583/1238
10. Dorantes-Salazar, E. L., Báez-González, J. G., Gastelúm-Martínez, É., Morales-Landa, J. L. y García-Marquez, E. (2023). Determinación de actividad antioxidante en alimentos funcionales. Investigación y Desarrollo en Cien-cia y Tecnología de Alimentos, 8, 643-649. https://idcyta.uanl.mx/index.php/i/article/download/84/79
11. Hernández Espinosa, Diego Rolando, Barrera Morín, Vanessa, Briz Tena, Oliva, González Herrera, Esli Abril, Laguna Maldonado, Kevin David, Jardínez Díaz, Alicia Sofía, Sánchez Olivares, Mijail, & Matuz Mares, Deyamira. (2019). El papel de las especies reactivas de oxígeno y de nitrógeno en algunas enfermedades neurodegenerativas. Revista de la Facultad de Medicina (México), 62(3), 6-19. Epub 16 de octubre de 2020.https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2019.62.3.03

12. Flores, E. M. R. (2021). Especies reactivas de oxígeno, importancia e implicación patológica. Revista científica ciencia médica, 24(2), 125-132. https://www.redalyc.org/journal/4260/426070530008/426070530008.pdf
13. Gutiérrez,V & Justo R. (2002). Daño oxidativo, radicales libres y antioxidantes. Revista Cubana de Medicina Militar, 31 (2), 126-133. Recuperado el 2 de julio de 2025 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0138-65572002000200009&lng=es&tlng=es.
14. Rudrapal, M., Rakshit, G., Singh, R. P., Garse, S., Khan, J., & Chakraborty, S. (2024). Dietary Polyphenols: Review on Chemistry/Sources, Bioavailability/Metabolism, Antioxidant Effects, and Their Role in Disease Management. Antioxidants, 13(4), 429. https://doi.org/10.3390/antiox13040429
15. An, J., Zhang, Z., Jin, A., Tan, M., Jiang, S., & Li, Y. (2025). Organic Functional Groups and Their Substitution Sites in Natural Flavonoids: A Review on Their Contributions to Antioxidant, Anti-Inflammatory, and Analgesic Capabilities. Food science & nutrition, 13(5), e70191. https://doi.org/10.1002/fsn3.70191 https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12041660/
16. Hernández Guiance, S. N., Marino, L., Isern, D. M., Coria, I. D., & Irurzun, I. M. (2019). Flavonoides: aplicaciones medicinales e industriales. Invenio, 22. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/185975/CONICET_Digital_Nro.a4cd60c0-3e4b-4d6c-a647-9cfe8a9c402c_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
17. Turner, B. L. (2008). Taxonomic status of Clinopodium macrostemum (Lamiaceae). Phytologia, 90(3), 411-413. https://www.phytologia.org/uploads/2/3/4/2/23422706/903411-413turnerclinopodiummacrostemum.pdf
18. Rojas-Olivos, A., Solano-Gómez, R., Granados-Echegoyen, C., Santiago-Santiago, L. A., García-Dávila, J., Pérez-Pacheco, R., & Lagunez-Rivera, L. (2018). Larvicidal effect of Clinopodium macrostemum essential oil extracted by microwave-assisted hydrodistillation against Culex quinquefasciatus (Diptera: Culicidae). Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, 51(03), 291-296. https://www.scielo.br/j/rsbmt/a/WzBcx7XPdvbx7FJwpfgDszx/?lang=en
19. Villa-Ruano, N., Pacheco-Hernández, Y., Cruz-Durán, R., & Lozoya-Gloria, E. (2015). Volatiles and seasonal variation of the essential oil composition from the leaves of Clinopodium macrostemum var. laevigatum and its biological activities. Industrial Crops and Products, 77, 741-747. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669015304167
20. Gutiérrez, G. O., Ramírez, M. A., Flores, H. J. M., Avalor, V. M. C., Chávez, A. G., Garciglia, R. S., & Díaz, R. D. V. (2010). Caracterización molecular en té nurite Satureja macrostema (Benth) Briq. mediante marcadores RAPDs. Foresta Veracruzana, 12(1), 27-32.
21. Pérez-Ochoa, M. L., Vera-Guzmán, A. M., & Chávez-Servia, J. L. (2024). Antioxidant Compounds and Activity of the Medicinal Plants Tagetes sp. and Clinopodium sp. from Indigenous Communities in Mexico. Journal of Medicinal plants and By-Products, 13(2), 417-428. https://jmpb.areeo.ac.ir/article_129780_9f0d98489feac8ef88389e8ef113f2db.pdf
22. C. A. Zornoza C. (2025) Determinación químico proximal, perfil fitoquímico, capacidad antioxidante y antimicrobiana de extractos de nurite (Clinopodium macrostemum, Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze de Paracho de Verduzco, Michoacán, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas
23. Zheng, Y., Zhou, Y., Liang, Q., Chen, D., Guo, R., Xiong, C., Xu, X., Zhang, Z. y Huang, Z. (2017). Solvent effects on the intramolecular hydrogen-bond and antioxidative properties of apigenin: A DFT approach. Dyes and Pigments. 141(1): 179-187. Doi: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2017.02.021.
24. Sierra M, Barros R, Gómez P, Mejía A y Suarez D. (2018). Productos Naturales: Metabolismo secundaria y aceites esenciales. Edit. Fundación Universitaria Agraria de Colombia (UNIAGRARIA). Bogotá, Colombia.
25. Ramón, Carolina, & Gil-Garzón, Maritza Andrea. (2021). Efecto de los parámetros de operación de la extracción asistida por ultrasonido en la obtención de polifenoles de uva: una revisión. TecnoLógicas, 24(51), 263-277. Epub October 11, 2021.https://doi.org/10.22430/22565337.1822 http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992021000200263&script=sci_arttext

26. Azuola, R., & Vargas, P. (2007). Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EUA). Tecnología en marcha, 20(4), 30-40. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=699878328004
27. Pripdeevech,P., Chumpolsri,W.,Suttiarporn,P.,Wongpornchai. (2010), The chemical composition and antioxidant activities of basil from Thailand using retentionindices and compreshensive two- dimensional gas chromatography. Journal of the Serbian Chemical society 75: 1503-1513. Doi: 10.2298/JSC100203125P
28. Chang,Ch-Ch., Yang, M-H., When,H-M., Chern, J-Ch. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. Journal of Food and drug Analysis. 10:178-182. Doi: https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748.
29. Karamác,M. Kósinska, A., Pegg, R.B.(2005), Comparasion of raficalscavenging activities for selected phenolic acids. Polish Journal of Food and Nutrition sciences. 14/55:165-170. ISSN: 1230-0322.
30. Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., Hawkins, B. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. Journal of food composition and analysis 19, 669-675. Doi: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003
31. Yuan, T., Lin, C., Yu, Q., Shi, X., Jin, P., Huang, J., ... & Fan, H. (2025). Ultrasonic-assisted acidified aqueous two-phase extraction for one-step production and recovery of flavonoid aglycones from Malvaviscus arboreus Cav. flower: Process exploration, composition analysis and activity validation. Ultrasonics Sonochemistry, 107545.
32. Lv, J., Li, L., Liang, Z., Wu, W., Zhang, N., & Jia, Q. (2025). Extraction of Bound Polyphenols from Elaeagnus angustifolia L. by Ultrasonic-Assisted Enzymatic Hydrolysis and Evaluation of Its Antioxidant Activity In Vitro. Foods, 14(9), 1567.
33. Cao, Q., Zhang, Y., Liu, H., Cheng, Y., Liu, M., Zhao, H., ... & Sun, Q. (2023). The lipid peroxidation-derived DNA adduct γ-OHPdG as a diagnostic and prognostic biomarker in hepatocellular carcinoma. Aging (Albany NY), 15(14), 7258.
34. Demesa, A. G., Saavala, S., Pöysä, M., & Koiranen, T. (2024). Overview and toxicity assessment of ultrasound-assisted extraction of natural ingredients from plants. Foods, 13(19), 3066.
35. Cao, Q., Zhang, Y., Liu, H., Cheng, Y., Liu, M., Zhao, H., ... & Sun, Q. (2023). The lipid peroxidation-derived DNA adduct γ-OHPdG as a diagnostic and prognostic biomarker in hepatocellular carcinoma. Aging (Albany NY), 15(14), 7258.

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA, PROXIMAL Y ANTIOXIDANTE DE ADEREZOS DE ARÁNDANO

Laura Gabriela Espinosa Alonso, María Fernanda Jauregui Angulo, Sergio Medina Godoy, Rosa Luz Gómez Peraza, Maribel Valdez Morales.

Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Sinaloa.
lespinosaa@ipn.mx.

RESUMEN

Los aderezos se utilizan para mejorar los atributos sensoriales de un alimento, además de conferir identidad gastronómica y cultural. El constante crecimiento del mercado nacional e internacional de salsas y condimentos ha impulsado el desarrollo de formulaciones que, además de cumplir funciones organolépticas, integren compuestos bioactivos asociados a beneficios para la salud, aportando un valor agregado. Tomando en consideración esta demanda del mercado, se desarrollaron dos aderezos experimentales, uno tipo barbacoa (BBQA) y otro tipo vinagreta (VA), ambos formulados con arándano, este trabajo surge con el propósito de evaluar su calidad fisicoquímica, composición proximal y potencial antioxidante en comparación con productos comerciales similares.

En aderezos frescos se determinaron las propiedades fisicoquímicsa como pH, porcentaje de acidez titulable, color en el sistema CIELab* y sólidos solubles (°Brix). El análisis proximal se efectuó en harina liofilizada, cuantificando humedad, proteína, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y extracto libre de nitrógeno, así como el contenido energético (kcal/100 g), conforme a métodos oficiales de la AOAC y fueron reportados como g/100 g de aderezo fresco. El contenido de compuestos fenólicos totales se determinó mediante la técnica de Folin-Ciocalteu y la capacidad antioxidante se evaluó por los métodos DPPH y ABTS, a partir de extractos etanólicos al 80% obtenidos de las harinas de aderezos liofilizadas. Para fines comparativos, se analizaron dos aderezos comerciales análogos. Los parámetros fisicoquímicos de ambas formulaciones se ubicaron dentro de los rangos adecuados de acidez para preservar el equilibrio sensorial entre notas dulces, ácidas y saladas, característico de estos productos. El bajo contenido de sólidos solubles sugiere un aporte energético moderado sin comprometer la dulzura necesaria para equilibrar la acidez y los matices picantes, particularmente en el aderezo tipo BBQ. El color marrón-rojizo observado de los aderezos es propio de los aderezos tipo BBQ y puede relacionarse con atributos de productos artesanales y naturales. En la composición proximal, el aderezo BBQ presentó mayor contenido de proteína y extracto etéreo, con un valor energético de 395 kcal/100 g, mientras que la vinagreta destacó por mayor contenido de fibra cruda y cenizas, así como menor aporte energético (345.49 kcal/100 g). El aderezo BBQ mostró arriba de un 100% de compuestos fenólicos totales respecto a la vinagreta, y ambas formulaciones superaron a los productos comerciales. El poder antirradical (DPPH y ABTS) evaluado como capacidad antioxidante, mostro 74.5 y 79% de inhibición para el aderezo BBQ y 46.6 y 53% para la vinagreta, respectivamente, frente a los aderezos comerciales (46% y 23.5%, respectivamente). Los resultados indican que los aderezos desarrollados presentan calidad fisicoquímica comparable a productos comerciales, con ventajas en contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, lo que respalda su potencial como alternativas con valor funcional. Se recomienda complementar con estudios sensoriales y microbiológicos para establecer su aceptación y estabilidad durante el almacenamiento.

INTRODUCCIÓN

ALIMENTOS FUNCIONALES

El concepto de alimentos funcionales surge en Japón durante la década de 1980 como resultado de políticas públicas orientadas a promover la investigación en nutrición y salud, con el fin de identificar alimentos con capacidad para mejorar funciones fisiológicas específicas (Litwin et al., 2018). En este

contexto, se estableció la categoría de alimentos denominados *Foods for Specified Health Use* (FOSHU), los cuales cuentan con la aprobación del Ministerio de Salud y Bienestar japonés. Estos productos se definen como alimentos procesados que contienen ingredientes capaces de ejercer efectos beneficiosos sobre funciones fisiológicas del organismo, más allá de su aporte nutrimental convencional (Alvídrez et al., 2017).

A pesar de más de cuatro décadas de evolución y expansión en el mercado internacional, no existe una definición universalmente aceptada de alimentos funcionales. No obstante, diversos organismos internacionales de nutrición y dietética coinciden en que estos alimentos deben proporcionar beneficios adicionales para la salud, más allá de la nutrición básica. Una definición integradora establece que un alimento funcional es aquel, natural o procesado, que contiene compuestos bioactivos identificados, consumido como parte de la dieta habitual en cantidades normales, y que ha demostrado científicamente efectos positivos sobre una o más funciones fisiológicas del organismo, contribuyendo al mantenimiento del bienestar, así como a la prevención o manejo de enfermedades crónicas (Martirosyan & Singh, 2015).

Desde un enfoque tecnológico, los alimentos funcionales pueden ser productos en los que se ha modificado intencionalmente la composición mediante la adición, eliminación o incremento de determinados componentes, o mediante la alteración de su biodisponibilidad, con el propósito de potenciar sus efectos beneficiosos (Hernández, 2010). Con relación a esto, los compuestos fenólicos destacan como uno de los principales grupos de compuestos bioactivos utilizados en el diseño de alimentos funcionales, debido a su reconocida actividad antioxidante y su potencial efecto en la prevención de enfermedades asociadas al estrés oxidativo.

Resulta indispensable contar con un marco regulatorio para respaldar científicamente el desarrollo y comercialización de productos con valor funcional agregado. De manera internacional, el Codex Alimentarius establece las directrices para el uso de declaraciones nutricionales y de propiedades saludables (CAC/GL 23-1997), que incluye tres principales: 1) las relacionadas con la función de los nutrientes en procesos fisiológicos normales; 2) las que describen los efectos de compuestos no nutritivos sobre funciones específicas del organismo; y 3) las que abordan la reducción del riesgo de enfermedad o condiciones de salud específicas (Dable-Tupas et al., 2020).

ADEREZOS

La función principal de los aderezos es mejorar o potenciar las características sensoriales de los alimentos a los que se les adiciona, particularmente sabor, apariencia y textura. También se les denomina salsas o aliños, y juegan un papel clave en la aceptación de platillos basados en vegetales frescos como ensaladas, que pueden resultar poco apetecibles. Sin embargo, su composición, puede impactar significativamente el perfil nutricional del alimento con el que es consumido, ya que la adición de azúcares, aceite o sal, puede aumentar el contenido energético del producto final (Reza, 2016).

La mayor parte de los aderezos se caracterizan por ser sistemas coloidales, particularmente emulsiones aceite-en-agua, en las cuales la fase lipídica se dispersa en forma de gotas dentro de una fase continua acuosa; sin embargo, también existen los aderezos no emulsionados, que presentan estructuras más complejas, como las salsas condimentadas (cátsup o BBQ), que presentan matrices acuosas con componentes solubles y particulados. Esta diversidad estructural confiere a los aderezos desde un punto de vista físico-químico, una amplia variabilidad en sus propiedades reológicas, estabilidad y comportamiento sensorial (Reyes, 2021).

De acuerdo con su formulación y estabilidad, los aderezos también pueden clasificarse además en: 1) sistemas de aceite y vinagre, considerados emulsiones temporales; 2) aderezos emulsionados estables, como la mayonesa; 3) aderezos cocidos, en los que se incorporan agentes espesantes como almidones; y 4) productos reducidos en grasa o dietéticos, que emplean hidrocoloides para mantener la viscosidad y la textura en ausencia de altos contenidos lipídicos.

Tecnológicamente, los aderezos emulsionados, como la mayonesa, requieren de agentes emulsificantes (lecitinas de huevo) para estabilizar la dispersión de fases; mientras que los reducidos en grasa, emplean biopolímeros que desempeñan un papel fundamental en la generación de estructuras estables (Yang y Lai, 2003). Dentro de esta categoría se incluyen las salsas tipo BBQ que son productos no emulsionados, y presentan estructuras más complejas, y que puede tratarse de sistemas líquidos hasta altamente viscosos, que suelen incorporar ingredientes tales como tomate, especias, vinagre y azúcar, y cuya estabilidad depende de la acidez, los sólidos solubles y la interacción entre sus componentes (García-Casal et al., 2016).

Los aderezos están regulados para cumplir con normativas de calidad e inocuidad establecidas a nivel internacional y nacional. La FDA y el Codex Alimentarius establecen criterios de identidad principalmente enfocados en productos convencionales con alto contenido de grasa como la mayonesa; mientras que en México, se cuenta con las normas específicas mayonesa (NMX-F-021-NORMEX-2006 y NMX-F-341-NORMEX-2006) para establecer su calidad; Sin embargo, existe un vacío normativo para formulaciones innovadoras, como los aderezos reducidos en grasa o enriquecidos con compuestos funcionales (fibra, proteína vegetal o antioxidantes), en los cuales distintos aspectos como la estabilidad de la emulsión, la actividad de agua y la funcionalidad de biopolímeros adquieren mayor relevancia.

Resulta fundamental contar con la caracterización fisicoquímica y la composición nutrimental de los aderezos para evaluar su calidad, estabilidad y funcionalidad, que permitan comprender el comportamiento tecnológico del producto, a través de los parámetros fisicoquímicos como pH, acidez, sólidos solubles, color y estabilidad oxidativa, junto con su composición proximal. El estudio de estos parámetros adquiere mayor importancia al integrar ingredientes con potencial bioactivo, como frutas o vegetales ricos en compuestos fenólicos, en correspondencia con las tendencias actuales hacia el desarrollo de alimentos funcionales; por lo que el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la calidad fisicoquímica, composición proximal y capacidad antioxidante de aderezos formulados con arándano, en comparación con productos comerciales, con el fin de explorar su potencial como alternativas con valor agregado.

PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Alimentos Funcionales del CIIDIR, Sinaloa. Por cuestiones de confidencialidad, se omitirá la formulación y el proceso de la elaboración del producto, sin embargo, se trata de aderezos de arándano en su versión untable y vinagreta. Para fines comparativos se evaluaron dos aderezos comerciales: 1) de zarzamora y 2) de tuna con moras.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y NUTRIMENTALES.

Actividad de agua. Se evaluó con un higrómetro (Lab Stard- aw novasina) a partir del aderezo fresco.

Análisis colorimétrico. Se registró el color de los aderezos empleando la escala CieLab, L, a*, b* y ΔE, con un colorímetro Konica-Minolta (CIE, 1976; ISO 11664-4:2008)

pH se registró directamente en la muestra fresca con un potenciómetro (pHmetro mod. 2210 Hanna Instruments). Este procedimiento se llevó a cabo siguiendo la AOAC 981.12 (Horwitz & Latimer, 2005) que establece las especificaciones para la medición de pH en alimentos y bebidas.

Acidez titulable. Se evaluaron los ácidos orgánicos totales de los aderezos frescos por titulación con NaOH 0.1 N y fenolftaleína como indicador y fue calculada y expresada cómo % de ácido cítrico empleando la fórmula establecida en la AOAC 942.15 (Horwitz & Latimer, 2005). % Acidez titulable = 0.0064 x Vol NaOH (mL/ g muestra) x 100.

°Brix se determinaron con ayuda de un refractómetro Pocket Brix-acidity meter marca ATAGO, siguiendo la norma (ISO 2173, 2003), tomando en consideración el factor de dilución (100 mL/ 20g = 5).

Análisis proximal. Estos análisis se realizaron a partir de los aderezos liofilizados, el proceso de liofilización se efectuó a -50°Cy 0.045 mBar de vacío por 72 horas (liofilizadora Labconco FreeZone 6 Liter -50°C Console Freeze Dryer), protegiendo las muestras de la luz.

El contenido de humedad, cenizas, grasa, fibra, proteína y extracto libre de nitrógeno, que corresponde a los carbohidratos, se evaluó de acuerdo con los métodos oficiales de la AOAC (1995). La humedad se determinó por gravimetría después de secar a 105 ºC durante 6 horas en horno de conexión forzada (Binder) (método 934.01, AOAC). Las cenizas se determinaron por calcinación de las muestras en una mufla por 4 horas a 525 ºC (método 942.05, AOAC). La grasa por extracción Soxhlet con éter de petróleo (método 991.10, AOAC). La proteína se obtuvo por digestión ácida mediante Kjeldahl (método 32.1.22, AOAC), obteniendo el nitrógeno total y calculando la proteína con el factor de 6.5 El extracto libre de nitrógeno se determina por diferencia del 100% y la sumatoria de todos los anteriores y corresponde a los carbohidratos totales. Los resultados se calcularon y expresaron en gramos por 100 gramos de peso fresco, tomando en consideración el porcentaje de humedad inicial del producto.

COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES

Para obtener el extracto crudo de compuestos fenólicos de los aderezos elaborados en este proyecto, así como los comerciales, se utilizó etanol al 80% como solvente para la extracción y la harina de aderezos liofilizados. El extracto se realizó en proporción 1:10 (p/v) a partir de 500 mg de los aderezos liofilizados y 5 mL de etanol al 80%; después de vortexear, se sonicó por 10 min. en un baño ultrasónico (Branson, mod. 5800 CPXH), posteriormente, se realizó la agitación de las muestras a 40 °C a 200 rpm durante 1 hora (Baño con agitación, Thermo scientific mod. TSSWB27) y el extracto fue colectado a partir del sobrenadante obtenido por centrifugación a 6000 rpm por 15 min (Hermle, mod. Z 366), para separar el sobrenadante, el cual fue recolectado para su posterior análisis.

La determinación de fenoles totales de los extractos de compuestos fenólicos de los aderezos se realizó con el método de Folin Ciocalteau, empleando microplacas de 96 pozos (Singleton, et al., 1995). El extracto se diluyó en proporción 1:2, empleando etanol 80% y se prepararon curvas de calibración de ácido gálico y catequina (stock de 1mg/mL) en un rango de concentración de 5 a 300 µg/mL. La reacción se llevó a cabo con 10 µL del extracto y/o EtOH 80%, (empleado como blanco) y10 µL de reactivo Folin-Ciocalteu (1:1 v/v, con agua destilada) y 140 µL de agua destilada. Una vez incubados en oscuridad por 3 minutos, 40 µL de Na_2CO_3 al 7.5% fueron adicionados. La reacción se completó durante 15 minutos a 45 °C en oscuridad. Se registró la absorbancia a 760 nm (Thermo Scientific, mod. Multiskan GO). Los resultados fueron expresados como mg equivalentes de ácido gálico y catequina por 100 gramos de aderezo fresco.

CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

DPPH, siguiendo el método de Cardador-Martínez et al. (2006) con algunas modificaciones. Se utilizaron los extractos etanólicos anteriormente elaborados para compuestos fenólicos y se diluyeron (1:2, EtOH 80%). La curva de calibración de Trolox (25 a 600 µM), se elaboró a partir de un stock de 800 µM, y se preparó una solución de DPPH (150 µM), ajustando la absorbancia inicial a una absorbancia de 0.8 leída a 515 nm. La reacción en la microplaca consistió en la mezcla de 20 µL del extracto y/o cada estándar de la curva, y 200 µL de la solución de DPPH recién preparada. Las placas se incubaron a temperatura ambiente, protegidas de la luz, durante 30 minutos y se leyó la absorbancia (515 nm) en espectrofotómetro (Thermo Scientific mod. Multiskan GO*),* en intervalos de 30, 60, 75 y 90 minutos). Los resultados fueron expresados como µMolar de Trolox por gramo de 100 g de aderezo fresco y como porcentaje de inhibición del radical DPPH.

ABTS, fue evaluada empleando la metodología de Re, et al. (1999). A partir de los extractos etanólicos diluidos (1:2, EtOH 80%), empleados para DPPH se evaluó la capacidad de inhibir los radicales ABTS; para ello se empleó una curva de calibración de Trolox (50 a 500 µM). La solución de trabajo de ABTS, se preparó a partir de un stock (7 mM), y a partir de ella, se obtuvo la solución de trabajo (0.14 mM), diluyendo con agua en proporción (1:50) y fue leída a 735 nm y ajustada a una absorbancia de 0,7. La reacción se preparó a partir de 20 µL del extracto, y/o del blanco y 200 µL de la solución de trabajo de ABTS. Posteriormente, se registra la lectura a 735 nm y los resultados se expresan como µMolar de Trolox por 100 gramos de aderezo fresco. También, se calculó el porcentaje de los radicales ABTS.

$$\%\ \boldsymbol{Inhibición\ ABTS} = \mathbf{100} * (\mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{abs\ muestra}}{\boldsymbol{abs\ blanco}})$$

RESULTADOS

La elaboración de los aderezos se llevó a cabo a nivel laboratorio bajo estrictas condiciones de buenas prácticas de manufactura, garantizando la calidad e inocuidad del proceso. Durante su preparación, las formulaciones fueron sometidas a un tratamiento térmico de cocción seguido de un envasado adecuado, con el fin de asegurar su estabilidad y conservación. De manera esquemática, la Figura 1a presenta el flujo general del proceso de elaboración de los aderezos tipo BBQ y vinagreta a base de arándano, mientras que la Figura 1b muestra los productos finales obtenidos, así como los aderezos comerciales utilizados como referencia para su comparación

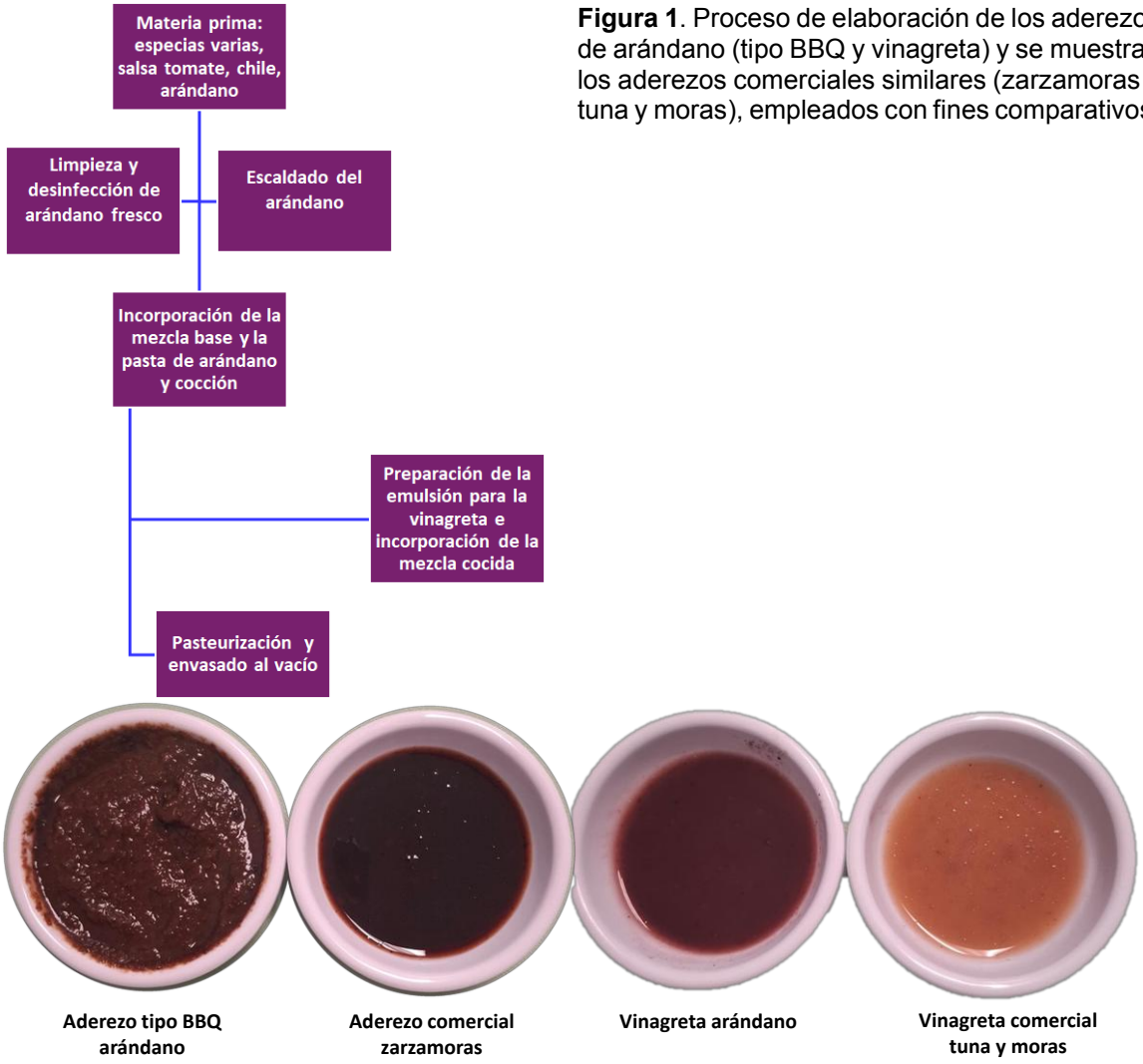


Figura 1. Proceso de elaboración de los aderezos de arándano (tipo BBQ y vinagreta) y se muestran los aderezos comerciales similares (zarzamoras y tuna y moras), empleados con fines comparativos.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y NUTRIMENTALES.

Las propiedades fisicoquímicas de los aderezos formulados a base de arándano presentaron valores consistentes con los reportados para productos de esta categoría (Cuadro 1). El contenido de acidez titulable en ambos aderezos se ubicó en el rango de 3.5–4.0%, considerado adecuado para mantener un equilibrio sensorial entre las notas dulces, ácidas y saladas, particularmente en formulaciones tipo BBQ. Asimismo, este nivel de acidez contribuye a la estabilidad microbiológica del producto, al

inhibir el crecimiento de microorganismos, efecto asociado principalmente a la presencia de ácidos orgánicos provenientes de los ingredientes utilizados.

El contenido de sólidos solubles fue de 16 y 12 °Brix para el aderezo tipo BBQ y la vinagreta, respectivamente, lo cual refleja un bajo nivel de dulzor en comparación con las formulaciones comerciales. Esta característica fue intencionalmente considerada en el diseño del producto con el objetivo de ofrecer una alternativa reducida en azúcares, sin comprometer el balance sensorial necesario para este tipo de alimentos. En contraste, las salsas BBQ comerciales suelen presentar valores de 30 a 45 °Brix, lo que indica una elevada concentración de azúcares y, en muchos casos, su clasificación como productos altos en este componente (Unilever España S.A Patente No. 67421748, 2021). En este sentido, la reducción de sólidos solubles en las formulaciones desarrolladas implica un menor aporte energético, aspecto relevante para consumidores que buscan opciones más saludables.

Fisicoquímicos		Aderezo tipo BBQ	Aderezo tipo Vinagreta
Acidez (%)		3.48 ± 0.03	3.40 ± 0.04
°Brix		16 ± 0.01	12 ± 0.01
Color	L*	23.05 ± 0.71	21.03 ± 0.76
	a*	5.41 ± 0.77	3.24 ± 0.29
	b*	3.16 ± 0.37	0.16 ± 0.03
	ΔE*	14.69 ± 0.84	14.66 ± 0.65
pH		4.38 ± 0.04	4.47 ± 0.04
Humedad (%)		70.5 ± 0.42	70.51 ± 0.03

Promedio y desviación estándar (n=5)

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas de los aderezos de arándano, tipo BBQ y vinagreta.

Los aderezos presentaron un color con tonalidades marrón-rojizas característicos de este tipo de aderezos BBQ (Figura 1), con matices rojos (a*) y amarillos (b*). Esta coloración se asocia con la presencia de carotenoides y otros pigmentos naturales provenientes de ingredientes como tomate y arándano, así como con reacciones inducidas por el tratamiento térmico, como la caramelización de azúcares y las reacciones de Maillard. El aderezo tipo BBQ mostró una mayor saturación e intensidad de color en comparación con la vinagreta, lo cual coincide con valores más altos de luminosidad (L*), a* y b*. Este tipo de tonalidades suele asociarse con productos de apariencia artesanal y natural, cualidades altamente valoradas por el consumidor.

Los valores de pH obtenidos (4.38 y 4.47) fueron similares para ambos aderezos, situándose por debajo de 4.6, considerado el límite internacional para clasificar un alimento como ácido. Además, este pH permite inhibir el crecimiento de microorganismos patógenos, como *Clostridium botulinum*, contribuyendo con la inocuidad del producto. Algunos autores, recomienda formular productos con valores de pH aún más bajos (≤ 4.2) para garantizar la estabilidad y prolongar su vida útil.

Ambos productos contuvieron alrededor de 70% de humedad, lo que indica que son productos altamente hidratados con textura semilíquida, característica que favorece su aplicación y aceptación sensorial. Sin embargo, este alto contenido de humedad implica también una alta actividad de agua, lo que hace indispensable el control de parámetros como el pH para asegurar su estabilidad microbiológica.

La figura 2 muestra la composición proximal de los aderezos, expresada en base fresca. E aderezo tipo BBQ presentó un mayor contenido de proteína (2.60%) y grasa (2.06%) en comparación con la vinagreta (1.54% y 0.36%, respectivamente), lo que brinda una mayor consistencia, untuosidad y aporte energético. Por el contrario, la vinagreta destacó por su alto contenido de fibra cruda (3.34%), que corresponde al doble del que contiene el BBQ (1.49%), lo que indica una mayor presencia de componentes vegetales insolubles, caracterizándola además como una formulación baja en lípidos, con una textura más ligera y menor densidad calórica.

El contenido de cenizas fue similar en ambos productos (~1.5%), reflejando una adecuada aportación mineral, aunque más bajo que lo reportado para BBQ. En cuanto a los carbohidratos (expresados como extracto libre de nitrógeno, ELN), ambos aderezos presentaron valores comparables (~22%), que resultan significativamente menores que lo reportado para BBQ (USDA, FoodData Central, 2018), compuestos altamente relacionados con la contribución del dulzor, viscosidad y desarrollo de color en el caso del BBQ. Estas diferencias composicionales se reflejan en el aporte energético, que fue mayor en el aderezo tipo BBQ (395 kcal/100 g) en comparación con la vinagreta (345 kcal/100 g).

En comparación con salsas BBQ comerciales, las formulaciones desarrolladas presentaron un mayor contenido de humedad (~70% vs. 50–60%), menor contenido de carbohidratos (~22% vs. 35–45%) y mayores niveles de proteína y grasa, lo que sugiere una matriz menos dependiente de azúcares y más rica en componentes estructurales. Por otro lado, las vinagretas comerciales suelen caracterizarse por altos contenidos lipídicos (20–60%) en sistemas emulsionados (Yin, et al., 2022), mientras que la formulación evaluada se distingue por su bajo contenido de grasa y elevada proporción acuosa, configurándose como un sistema alternativo con características distintivas.

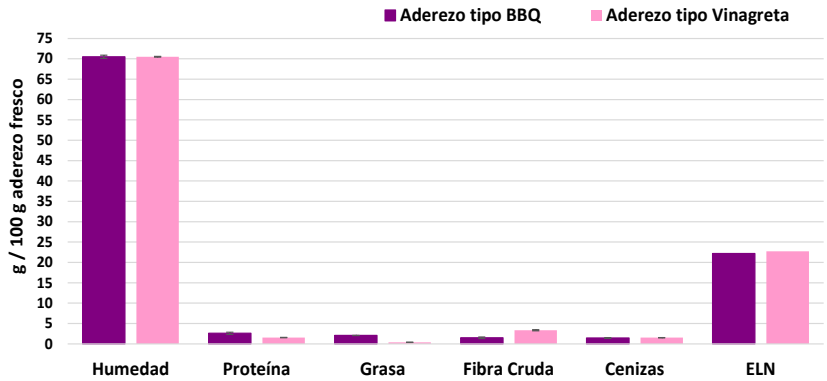


Figura 2. Composición proximal de aderezos liofilizados y expresada en base fresca considerando un contenido de humedad del 70.5%. Promedio y desviación estándar (n=3).

COMPUESTOS FENÓLICOS TOTALES

El aderezo tipo BBQ presentó contenidos significativamente mayores de compuestos fenólicos totales en comparación con la vinagreta elaborada con arándano, alcanzando valores de 60.77 mg equivalentes de ácido gálico y 66.1 mg equivalentes de catequina por 100 g (base fresca), frente a 30.68 y 39.8 mg/100 g, respectivamente. En ambos casos, las formulaciones experimentales superaron a los productos comerciales analizados, lo que sugiere una mayor concentración de compuestos bioactivos y un mayor potencial funcional. El elevado contenido fenólico del aderezo tipo BBQ puede asociarse con su mayor intensidad cromática y mayor concentración de sólidos solubles, lo que indica una mayor densidad de compuestos derivados de ingredientes vegetales. Por su parte, en la vinagreta experimental, el contenido de fenoles parece estar relacionado con su mayor proporción de fibra cruda, reflejando una mayor presencia de componentes estructurales de origen vegetal. En contraste, la vinagreta comercial presentó valores considerablemente bajos, lo que evidencia una menor contribución de compuestos fenólicos y, por ende, un menor potencial antioxidante.

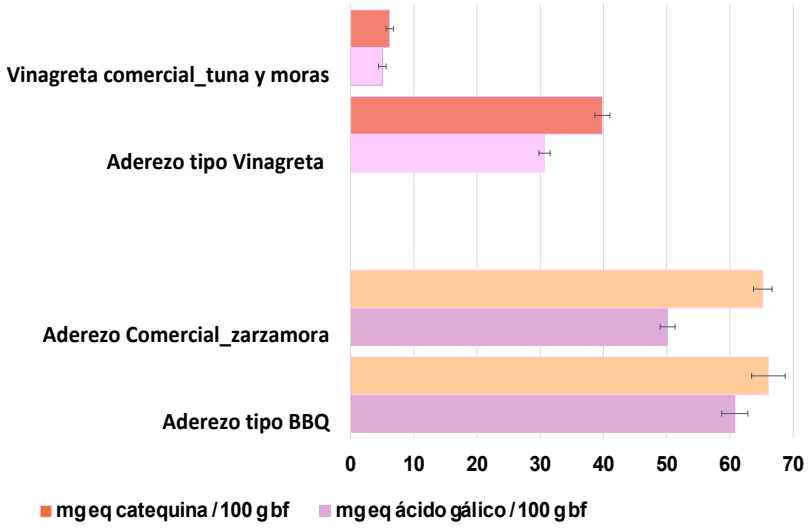


Figura 3. Comparación del contenido de compuestos fenólicos totales (Folin-Ciocalteau) de aderezos de arándano, con aderezos comerciales similares. Promedio y desviación estándar (n=3).

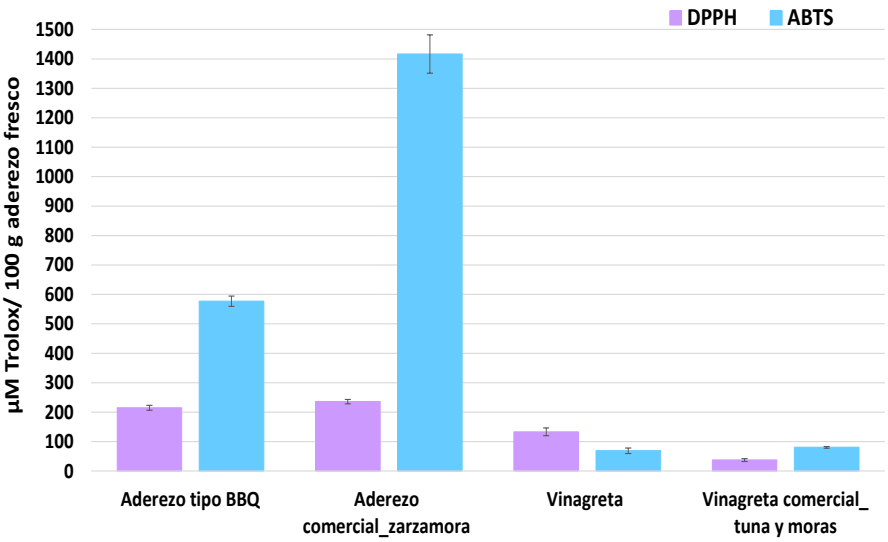
CAPACIDAD ANTIOXIDANTE

Los resultados de capacidad antioxidante mostraron tendencias consistentes con el contenido de compuestos fenólicos. El aderezo tipo BBQ presentó la mayor actividad antirradical, con valores de inhibición de 74.5% y 78.8% en los ensayos DPPH y ABTS, respectivamente. En comparación, la vinagreta experimental mostró valores menores (46.6% y 53.3%), aunque significativamente superiores a los de sus contrapartes comerciales (Figura 4A y 4B).

En general, las formulaciones desarrolladas exhibieron una mayor eficacia antioxidante, lo cual puede atribuirse a su mayor contenido de compuestos bioactivos provenientes de ingredientes vegetales frescos. Adicionalmente, factores como el tiempo de almacenamiento de los productos comerciales podrían haber contribuido a la reducción de su actividad antioxidante, debido a la degradación de compuestos sensibles.

Se observó una correlación positiva entre el contenido de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de los aderezos de arándano evaluados por DPPH, pero no para los resultados de ABTS, ya que el aderezo comercial de zarzamora presentó valores significativamente más altos (1416.6 µM Trolox/100 g, base fresca) en comparación con el aderezo BBQ (577.0 µM Trolox/100 g, base fresca). Esto puede explicarse por la contribución de otros compuestos antioxidantes no fenólicos, como carotenoides, ácidos orgánicos o productos derivados de las reacciones de Maillard o bien, a interferencias analíticas relacionadas con un mayor contenido de azúcares reductores y otros compuestos solubles (Figura 4A). Las diferencias observadas entre los métodos DPPH y ABTS permiten identificar distinta sensibilidad para cada ensayo frente a compuestos antioxidantes específicos, que se confirma con la complejidad de la matriz alimentaria evaluada.

A



B

	% Inh_DPPH	% Inh_ABTS
Aderezo tipo BBQ	74.5 ±2.7	79 ± 1.4
Aderezo comercial_zarzamora	45.9 ±1.3	43 ± 3.7
Vinagreta	46.6 ±4.2	53 ± 4.7
Vinagreta comercial_ tuna y moras	23.5 ±2.7	21 ± 2.5

Figura 4. A) Capacidad antioxidante y B) Porcentaje de inhibición del radicales ABTS y DPPH del extracto de aderezos (n=3).

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten identificar como la formulación de los aderezos, contribuye en las diferencias registradas en las propiedades fisicoquímicas, pero, sobre todo, en la composición nutrimental y el aspecto funcional de los aderezos.

El aderezo BBQ de arándano contiene más proteína y grasa, que impacta en una mayor carga energética y en una matriz alimentaria más compleja, que define su apariencia, viscosidad, así como su color. Por el contrario, la vinagreta presenta un contenido superior de fibra cruda y bajo contenido lipídico, lo que la describe como una vinagreta atípica, definiéndola más como una emulsión semilíquida acidificada con mayor contribución de componentes vegetales insolubles que influyen en su textura ligera y estabilidad física. Estas diferencias explican las principales variaciones en los parámetros de color y sólidos solubles. En comparación con los productos comerciales, el aderezo BBQ de arándano presentó niveles superiores de humedad, proteína y grasa y menor contenido de carbohidratos, lo que refleja un alimento menos dependiente de azúcares y más rico en compuestos estructurales, nutricionales y funcionales. Además, mostró un mayor contenido de compuestos fenólicos y una elevada capacidad antioxidante, reflejada en un alto porcentaje antirradical.

Se observó una tendencia positiva entre el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante por DPPH, pero no por ABTS, lo que sugiere la participación de otros compuestos antioxidantes y efectos de otros elementos como azúcares reductores. En conjunto, estos resultados indican que los aderezos BBQ y vinagreta muestran un potencial funcional superior como alternativas en el desarrollo de alimentos con valor agregado, con diferencias tecnológicas en comparación a productos comerciales similares

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Alvídrez-Morales, B. E. González, and J. Salas, “Tendencia en la producción de alimentos: Alimentos funcionales,” Facultad de Salud Pública y Nutrición, Universidad Autónoma de Nuevo León, Vol. 1, 2017.
2. AOAC International, Official Methods of Analysis of AOAC International, 16th ed. (AOAC International, Arlington, VA, 1995).
3. A. Cardador-Martínez, A. Albores, M. Bah, V. Calderón-Salinas, E. Castaño-Tostado, R. Guevara-González, A. Shimada-Miyasaka, and G. Loarca-Piña, “Relationship among antimutagenic, antioxidant and enzymatic activities of methanolic extract from common beans (Phaseolus vulgaris L.),” Plant Foods Hum. Nutr., Vol. 61, No. 4, 2006, pp. 161–168.
4. G. Dable-Tupas, M. C. B. Otero, and L. Bernolo, “Functional Foods and Health Benefits,” in Functional Foods and Health Benefits (Springer, Cham, Switzerland, 2020), pp. 1–11.
5. M. N. García-Casal, J. P. Peña-Rosas, and H. G. Malavé, “Sauces, spices, and condiments: definitions, potential benefits, consumption patterns, and global markets,” Ann. N. Y. Acad. Sci., Vol. 1379, No. 1, 2016, pp. 3–16.
6. Hellmann's, Patente No. 67421748 (Unilever España S.A., Madrid, Spain, 2021).
7. A. Gil Hernández, Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos, Vol. 2 (Editorial Médica Panamericana, Madrid, Spain, 2010).
8. W. Horwitz and G. W. Latimer, Eds., Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed. (AOAC International, Gaithersburg, MD, 2005).
9. International Commission on Illumination (CIE), Colorimetry, 2nd ed., CIE Publication No. 15 (CIE, Vienna, Austria, 1976).
10. International Organization for Standardization (ISO), ISO 11664-4:2008, Colorimetry—Part 4: CIE 1976 Lab Colour Space* (ISO, Geneva, Switzerland, 2008).
11. N. Litwin, J. Clifford, and S. Johnson, “Functional Foods for Health,” Colorado State University Extension, 2018.
12. D. M. Martirosyan and J. Singh, “A new definition of functional food by FFC: What makes a new definition unique?,” Funct. Foods Health Dis., Vol. 5, No. 6, 2015, pp. 209–223.
13. R. Re, N. Pellegrini, A. Proteggente, M. Yang, and C. Rice-Evans, “Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay,” Free Radic. Biol. Med., Vol. 26, Nos. 9–10, 1999, pp. 1231–1237.
14. S. L. Reyes, Análisis de las Propiedades Fisicoquímicas y Sensoriales de la Aplicación del Aceite de Girasol, Oliva y Sacha Inchi en la Elaboración de Mayonesa, Aderezo César y Alioli, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2021, pp. 35–120.
15. A. R. Reza, “Elaboración y caracterización de aderezo a base de mango,” Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Vol. 1, 2016, pp. 321–326.
16. United States Department of Agriculture, “Sauce, barbecue – Nutrients,” FoodData Central, USDA, Washington, DC, USA, accessed May 30, 2026. Sauce, barbecue - Nutrients - SR Legacy | USDA FoodData Central.
17. Secretaría de Economía, “Declaratoria de vigencia de las normas mexicanas NMX-F-021-NORMEX-2006 y NMX-F-341-NORMEX-2006,” Diario Oficial de la Federación, April 18, 2006.
18. V. L. Singleton, R. Orthofer, and R. M. Lamuela-Raventós, “Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent,” Methods Enzymol., Vol. 299, 1999, pp. 152–178.
19. S. Yang and L. Lai, “Dressings and mayonnaise: The products and their manufacture,” in Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Elsevier, London, UK, 2003), pp. 1892–1898.
20. M. Yin, M. Chen, T. Yanagisawa, R. Matsuoka, Y. Xi, N. Tao, and X. Wang, “Physical properties, chemical composition, and nutritional evaluation of common salad dressings,” Front. Nutr., Vol. 9, 2022, Article 978648.

DISEÑO MOLECULAR DE UNA CEPA DE *Bacillus Subtilis* PARA LA SOBREPRODUCCIÓN DE OXIDORREDUCTASAS QUE DEGRADAN CONTAMINANTES CARCINOGÉNICOS

Monzerrat López-Morales, Karen Abundiz-Yáñez, Mario Pedraza-Reyes.

Departamento de Biología. División de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Guanajuato.
pedrama@ugto.mx

RESUMEN

La industria de la curtiduría genera efluentes que congregan contaminantes tóxicos, como el cromo hexavalente [Cr(VI)] y colorantes azoicos. Estos compuestos son considerados contaminantes ambientales altamente peligrosos por su potencial mutagénico y carcinogénico. Los tratamientos tradicionales aplicados a estos efluentes presentan desventajas que impiden la eliminación completa de estos agentes. La biorremediación, empleando microorganismos, representa una alternativa sustentable y económica para la reducción de estos compuestos tóxicos. En este trabajo, se describe el diseño molecular de una cepa recombinante de Bacillus subtilis capaz de sobreexpresar los genes yhdA y ywqN para propiciar la producción simultánea de las oxidorreductasas YhdA y YwqN codificadas por aquellos. Con esta estrategia, se pretende generar una bacteria con propiedades de degradar de manera simultánea el Cr(VI) y colorantes azoicos presentes en efluentes de la industria curtidora.

INTRODUCCIÓN

El cromo y los colorantes son agentes indispensables durante el proceso de curtido y de coloración, respectivamente. Se ha reportado que cerca del 90% de las curtidurías a nivel mundial usan el cromo como agente de curtición (Tadesse y Guya, 2017) y cerca del 30% - 40% del cromo empleado es desechado en los efluentes industriales (Nur-E-Alam et al., 2020). Mientras que se estima que, entre 10% y 25% de los colorantes usados en la curtiduría, son desechados en los efluentes industriales (Yuan et al., 2020). El cromo (Cr) es un metal de transición y presenta diferentes estados de oxidación, siendo el estado de oxidación +6 [Cr(VI)] el más abundante en la naturaleza debido a su estabilidad y alta solubilidad. El Cr(VI), en forma de cromatos (CrO_4^{2-}) o dicromatos ($Cr_2O_7^{2-}$), es la especie más tóxica debido a que favorece la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) como el radical superóxido ($O_2\cdot^-$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales hidroxilos ($OH\cdot^-$) (Shi y Dalal, 1994; Liu y Shi, 2001; Itoh et al., 1995). En este contexto, la evidencia experimental ha demostrado que el Cr(VI) posee propiedades citotóxicas y genotóxicas en B. subtilis (Santos-Escobar et al., 2019), en plantas (Wakeel et al., 2020), así como en humanos (Gibb et al., 2000). El Cr(VI) puede ser reducido a Cr +3 [Cr(III)], el siguiente estado de oxidación de cromo más abundante, y se caracteriza por ser una forma menos tóxica debido a su insolubilidad en agua, lo que le permite formar complejos estables con materia orgánica e inorgánica (Cervantes et al., 2001; Gutiérrez-Corona et al., 2016). Los colorantes azoicos son compuestos orgánicos sintéticos que contienen al menos un enlace azo (-N=N-), generalmente flanqueado por grupos arílicos o alquílicos, estos colorantes son de amplio uso a nivel global (Chung, 2016). Debido a su naturaleza química, los colorantes azo, son recalcitrantes a procesos de degradación abióticos y fisicoquímicos, por lo que pueden permanecer por periodos de tiempo indefinidos en el medio ambiente (Bafana et al., 2011). Además, se ha reportado que los productos derivados de su descomposición, incluyendo a las aminas aromáticas, pueden generar mutagénesis y carcinogénesis (Chung, 2016; Feng et al., 2012). El cromo y los colorantes azoicos son agentes químicos que tienden a ser complicados de eliminar usando las técnicas de tratamiento tradicionales, por lo que la búsqueda de enfoques novedosos de tratamiento eficientes, de bajo costo y sin generar nuevos residuos, es fundamental para un desarrollo sostenible. Los tratamientos de origen biológico representan una alternativa ecológicamente viable en la remediación de estos contaminantes. El uso de bacterias o las enzimas que estas producen ha ganado importancia por su potencial en el tratamiento de efluentes de la

industria curtidora contaminados con Cr(VI) y colorantes azoicos. B. subtilis es una fuente importante de factores aplicados en distintos ámbitos biotecnológicos; este organismo, clasificado como “Safe Grass”, posee un excelente sistema de secreción de diversas enzimas de alto valor industrial, médico y biotecnológico (Errington y van der Aart, 2020; Su et al., 2020). Hay evidencia que demuestra la capacidad de B. subtilis para eliminar Cr(VI) mediante diversos mecanismos como bioacumulación, biosorción y bioreducción (Gutiérrez-Corona et al., 2016; Zheng et al., 2015); igualmente, se ha reportado su capacidad de degradar colorantes azoicos (González et al., 2026; Deller et al., 2006). Previamente, en nuestro grupo de trabajo, se ha reportado que dichas actividades, cromato y azo reductasa, son atribuibles a la presencia de enzimas especializadas denominadas oxidorreductasas.

TEORÍA

Las oxidorreductasas son enzimas que catalizan la oxidación de una especie química (donador de electrones) para la posterior reducción de otra especie (especie aceptora de electrones) de acuerdo a la reacción: $A^- + B \ddot{} A^- + B^-$. Una subfamilia de oxidorreductasas utiliza al cofactor NAD(P)H como donador de electrones; en tanto que algunos de sus miembros requieren de cofactores prostéticos como FMN para su funcionamiento (Vidal et al., 2018). Dentro del bolsillo catalítico, el NAD(P)H cede un electrón al cofactor FMN, y después el FMN reducido transfiere los electrones al sustrato de la enzima, como iones metálicos o colorantes; a este mecanismo se le conoce como bi-bi ping-pong (Vidal et al., 2018; Deller et al., 2008). Las cromato reductasas son un grupo de enzimas citosólicas que poseen la capacidad de reducir el Cr(VI) a su forma menos tóxica, Cr(III), mediante un mecanismo aeróbico usando el NAD(P)H como donador de electrones y el FMN como intermediario en dicho transporte de electrones, reduciendo la generación de ROS (Valenzuela-García et al., 2020; Cervantes et al., 2001; Gutiérrez-Corona et al., 2016). Estudios previos han demostrado que B. subtilis posee la capacidad de reducir el Cr(VI) a Cr(III) (Figura 10) (Zheng et al., 2015; Ramli et al., 2025).

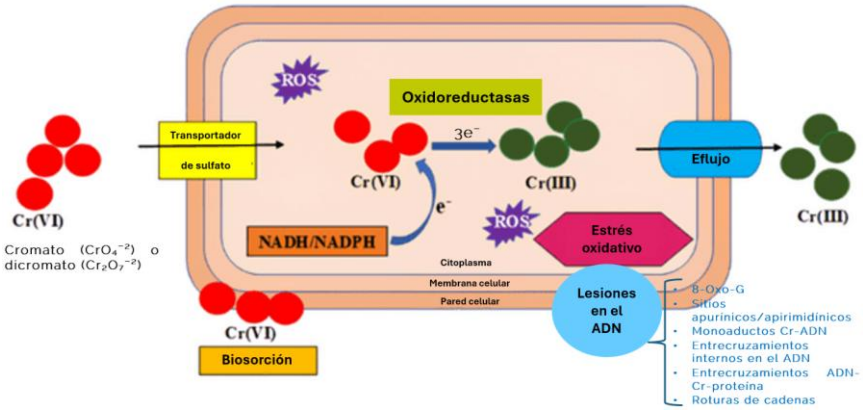


Figura 10. Representación del metabolismo bacteriano del Cr(VI). El cromato es internalizado mediante transportadores de sulfato y reducido a Cr(III) por enzimas oxidorreductasas citosólicas dependientes de NAD(P)H. La reducción puede involucrar transferencias de uno o más electrones y generar ROS como intermediarios, induciendo estrés oxidativo. El Cr(III) resultante es menos tóxico y puede ser exportado fuera de la célula o bioacumularse internamente. Tomada y modificada de Ramli et al. (2025).

El gen yhdA de B. subtilis codifica para una FMN reductasa dependiente de NAD(P)H con una masa molecular predicha de 18.76 kDa. Se ha propuesto que esta proteína cumple una función de quinona reductasa que evita la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) en la cadena transportadora de electrones (Binter et al., 2009). Por otra parte, en un estudio reciente se demostró que YhdA posee actividades enzimáticas secundarias de cromato reductasa (Valenzuela-García et al., 2020) y azorreductasa (Deller et al., 2006). Las azoreductasas son enzimas citosólicas que poseen la capacidad de reducir el enlace azo (-N=N-) de los colorantes azoicos, generando aminas aromáticas como subproductos (Deller et al., 2006; González et al., 2026) (Figura 11). B. subtilis

cuenta con este tipo de enzimas, capaces de procesar la reducción de los colorantes rojo de metilo, naranja de metilo (González et al., 2026), cibacrón marino y naranja IV (Deller et al., 2006).

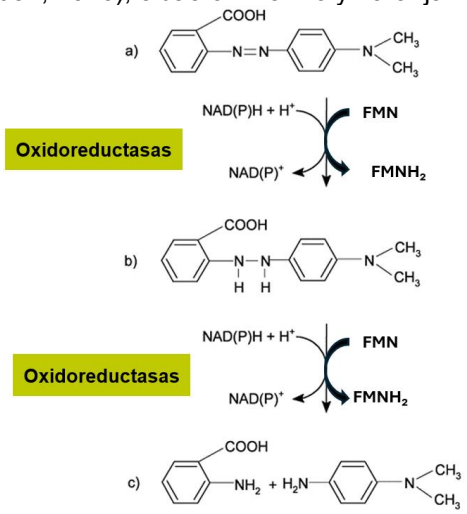


Figura 11. Representación del metabolismo bacteriano de colorantes azoicos. El característico enlace azo (a) es irrumpido mediante la acción de enzimas oxidorreductasas citosólicas dependientes de NAD(P)H. La reducción involucra la transferencia de un total de cuatro electrones realizada en dos pasos consecutivos (b). Los productos de degradación son aminas aromáticas (c). Tomada y modificada de Deller et al. (2008).

YwqN, una FMN reductasa dependiente de NAD(P)H, codificada por ywqN, posee una masa molecular de 20.33 kDa. Un reporte reciente demostró que en B. subtilis YwqN cumple una función de quinona reductasa capaz proteger a este organismo de los efectos nocivos de las ROS; además, se encontró que esta proteína posee actividad de azoreductasa (González et al., 2026).
La capacidad de YhdA y YwqN, de reducir Cr(VI) y colorantes Azo (Valenzuela-García et al., 2020; González et al., 2026), representa una alternativa prometedora para la biorremediación de los agentes contaminantes Cr(VI) y colorantes azoicos, altamente empleados en la industria de la curtiduría. En este contexto, la estrategia molecular desarrollada en este proyecto consistió en la incorporación de copias extra de los genes de interés, yhdA y ywqN, en regiones neutras del genoma de B. subtilis, bajo el control de promotores fuertes e inducibles por IPTG y xilosa, respectivamente. Esta estrategia pretende aumentar la producción de las proteínas YhdA y YwqN y potenciar la capacidad de B. subtilis para detoxificar Cr(VI) y colorantes azoicos presentes en efluentes industriales.

PARTE EXPERIMENTAL

Cepas bacterianas, vectores y medios de cultivo. Las cepas bacterianas de E. coli y B. subtilis, así como los vectores que se usaron en este estudio, se enlistan en la Tabla 1. El medio de cultivo empleado habitualmente fue Luria Broth (LB; formulación Lennox). Cuando se requirió, los medios se suplementaron con los antibióticos correspondientes, en las siguientes concentraciones: ampicilina (Amp) 100 µg/mL, kanamicina (Kn) 50 µg/mL, espectinomicina (Sp) 100 µg/mL y eritromicina (Erm) 1 µg/mL. Los cultivos líquidos se incubaron a 37 °C con agitación vigorosa (250 rpm). La densidad óptica (DO) de los cultivos líquidos se determinó con un espectrofotómetro Pharmacia Ultrospec 2000 ajustado a 600 nm. Para la transformación de B. subtilis por competencia, se emplearon los medios descritos por Spizizen (1958).

Técnicas de biología genética y molecular. La preparación de células competentes de E. coli o B. subtilis y su transformación con ADN se realizaron mediante protocolos previamente descritos (Sambrook et al., 1989; Spizizen, 1958). Para la extracción de ADN cromosómico de B. subtilis se utilizó el protocolo descrito por Cutting y Vander Horn (1990). La obtención de ADN a pequeña

escala, la manipulación enzimática y el análisis electroforético de ADN en geles de agarosa se realizaron utilizando técnicas estándar (Sambrook y Rusell, 2001).

Tabla 11. Cepas bacterianas y vectores utilizadas en este estudio.

Cepa	Genotipo/fenotipo	Referencia
	B. subtilis	
PERM110 (1A751)	B. subtilis 1A751 apr bglT/bglSΔEV egls(Δ)102 his npr	Stock de laboratorio.
PERM311 (168)	B. subtilis 168 trpC2	Stock de laboratorio.
PERM2094	B. subtilis 1A751 amyE::pDR111-yhdA; Sp^R	Generada en este estudio.
PERM2106	B. subtilis 1A751 amyE::pDR111; Sp^R	Generada en este estudio.
PERM2107	B. subtilis 1A751 lacA::pAX01; Erm^R	Generada en este estudio.
PERM2109	B. subtilis 1A751 lacA::pAX01-ywqN; Erm^R	Generada en este estudio.
PERM2113	B. subtilis 1A751 amyE::pDR111-yhdA; lacA::pAX01-ywqN; Sp^R Erm^R	Generada en este estudio.
PERM2145	B. subtilis 1A751 amyE::pDR111; lacA::pAX01; Sp^R Erm^R	Generada en este estudio.
E. coli		
PERM693	E. coli DH5α + pDR111; Amp^R	Stock de laboratorio.
PERM1744 (XL10 Gold)	E. coli endA1 glnV44 recA1 thi-1 gyrA96 relA1 lac Hte Δ(mcrA)183 Δ(mcrCB-hsdSMR-mrr)173 tet^R F'[proAB $lacI^qZ$ΔM15 Tn10 (Tet^R Amy Tn5(Kan^R)]	Stock de laboratorio.
PERM2070	E. coli XL10 Gold + pJET1.2/blunt-yhdA; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
PERM2071	E. coli XL10 Gold + pJET1.2/blunt-ywqN; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
PERM2072	E. coli XL10 Gold + pDR111-yhdA; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
PERM2096	E. coli XL10 Gold + pAX01-ywqN; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
PERM2110	E. coli XL10 Gold + pAX01; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
Vectores	Genotipo/fenotipo	Referencia
pJET1.2/blunt	Vector de clonación; Amp^R	Thermo Scientific, 2019.
pDR111 (pPERM693)	Vector de integración en locus amyE con origen de replicación en B. subtilis inducible por IPTG; Sp^R Vector con origen de replicación en E. coli; Amp^R	Stock de laboratorio (Rudner Lab).
pAX01 (pPERM2110)	Vector de integración en locus lacA con origen de replicación en B. subtilis inducible por xilosa; Erm^R Vector con origen de replicación en E. coli Amp^R	Härtl (2001).
pPERM2070	pJET1.2 + ORF del gen yhdA +21 pb río arriba del ATG y +74 pb río abajo del codón de paro para clonarse en el vector de integración pDR111; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
pPERM2071	pJET1.2 + ORF del gen ywqN +19 pb río arriba del ATG y +2 pb río abajo del codón de paro para clonarse en el vector de integración pAX01; Kn^R Amp^R	Generada en este estudio.
pPERM2072	Vector pDR111 + el ORF de yhdA +21 pb río arriba del ATG y +74 pb río abajo del codón de paro, con sitios de restricción SalI y SphI, para sobreexpresar la proteína en B. subtilis; Kn^R Amp^R Sp^R	Generada en este estudio.
pPERM2096	Vector pAX01 + el ORF de ywqN +19 pb río arriba del ATG y +2 pb río abajo del codón de paro, con sitios de restricción SalI y SphI, para sobreexpresar la proteína en B. subtilis; Kn^R Amp^R Erm^R	Generada en este estudio.

Obtención de una construcción génica para sobreexpresar el gen ywqN de B. subtilis. Para generar una cepa de B. subtilis capaz de sobreexpresar a ywqN, se amplificó mediante PCR el marco de lectura abierto (ORF) de ywqN de 587 pb, adicionando 19 pb río arriba del codón inicio conteniendo el sitio de unión de ribosomas nativo (RBS), y 2 pb río abajo del codón de paro, utilizando como molde ADN cromosómico de la cepa B. subtilis 168 (PERM311). En la reacción se utilizaron los oligonucleótidos sintéticos directo 5'-GCGGATCCACAAAGGAGCAGATGCATC-3' (con sitio BamHI, subrayado) y reverso 5'-GCCCGCGGCTTCATATCGCATCGCTT-3' (con sitio SacII, subrayado). La amplificación del ADN se realizó con la ADN polimerasa Vent, siguiendo las recomendaciones del fabricante (New England BioLabs, Ipswich, MA). El producto de PCR se clonó en el vector pJET1.2/blunt (Thermo Fisher Scientific) y los productos de la ligación se utilizaron para transformar células competentes de E. coli XL10-Gold (PERM1744). La presencia de la construcción, en las colonias transformantes, se corroboró mediante digestión de mini preparaciones de ADN plasmídico con las enzimas de restricción apropiadas, SacII y BamHI. De esta manera se generó la construcción pJET1.2-ywqN (pPERM2071). Posteriormente, la construcción se utilizó para liberar el ORF de ywqN mediante la digestión con las enzimas de restricción SacII y BamHI; al mismo tiempo se realizó la digestión del vector de integración/expresión pAX01 con las mismas enzimas. El ORF de ywqN se ligó entre los sitios SacII y BamHI del vector pAX01, inducible por xilosa, en una proporción 4:1 y con esta reacción, se transformaron células competentes de E. coli XL10-Gold (PERM1744). Las colonias transformantes seleccionadas se sujetaron a un análisis de restricción de minipreparaciones de ADN plasmídico con las enzimas SacII y BamHI. Siguiendo esta estrategia, se obtuvo la construcción pAX01-ywqN (pPERM2096). Para generar una cepa de B. subtilis capaz de sobreproducir la proteína YwqN (pAX01-ywqN) y la cepa control con el vector pAX01 vacío, la cepa B. subtilis 1A751 (PERM110) fue transformada en eventos independientes con la construcción pPERM2096 o el vector pAX01 vacío (pPERM2110). Tanto el vector como la construcción se integran en el locus lacA del genoma de B. subtilis 1A751. La corroboración de las colonias transformantes se realizó mediante PCR, con la ADN polimerasa Vent, amplificando el locus lacA empleando los oligonucleótidos directo 5'-GCTTGCATGGAGCGCACTTG-3' y reverso 5'-GCGTTTCAAGAGGCTCAAC-3'. Siguiendo esta estrategia, se generó la cepa PERM2109.

Obtención de una construcción génica para sobreexpresar el gen yhdA de B. subtilis. Para generar una cepa de B. subtilis capaz de sobreexpresar a yhdA, se amplificó mediante PCR un fragmento de 632 pb incluyendo el RBS nativo y 74 pb río abajo del codón de paro del gen. Se utilizó ADN cromosómico de la cepa B. subtilis 168 (PERM311) y los oligonucleótidos sintéticos directo 5'-GCGTCGACCCTGAATGGAGAGATCTC-3' (con sitio SalI, subrayado) y reverso 5'-GCGCATGCCGATATATTGATCATGCCACAG-3' (con sitio SphI, subrayado). La amplificación se realizó con la ADN polimerasa Vent. El producto de PCR se clonó en el vector pJET1.2/blunt (Thermo Scientific) y el producto de la ligación se utilizó para transformar células competentes de E. coli XL10-Gold (PERM1744). La presencia de la construcción, en las colonias transformantes, se corroboró mediante digestión de mini preparaciones de ADN plasmídico con las enzimas de restricción apropiadas, SalI y SphI. De esta manera se generó la construcción pJET1.2-yhdA (pPERM2070). Posteriormente, la construcción se utilizó para liberar el ORF de yhdA mediante la digestión con las enzimas de restricción SalI y SphI; al mismo tiempo se realizó la digestión del vector de integración/expresión pDR111 con las mismas enzimas. El ORF de yhdA se ligó entre los sitios SalI y SphI de pDR111, rió abajo del promotor Pspac, inducible por IPTG, en una proporción 4:1. Con esta reacción, se transformaron células competentes de E. coli XL10-Gold (PERM1744). Las colonias transformantes seleccionadas se sujetaron a un análisis de restricción de minipreparaciones de ADN plasmídico con las enzimas SalI y SphI. Siguiendo esta estrategia, se obtuvo la construcción pDR111-yhdA (pPERM2072). Para generar una cepa de B. subtilis capaz de sobreproducir la proteína YhdA (pDR111-yhdA) y la cepa control con el vector pDR111 vacío, la cepa B. subtilis 1A751 (PERM110) fue transformada en eventos independientes con la construcción pPERM2072 o el vector pDR111 vacío (pPERM693). Estas construcciones se integran en el locus amyE del genoma de B. subtilis 1A751. La corroboración de las colonias transformantes se realizó mediante PCR, amplificando el locus amyE con los oligonucleótidos directo 5'-GATCAAAAGCGGAACCATTCTTC-3' y reverso 5'-TTGAGCTCAATGGGGAAGAGAACCGC-3'. Siguiendo esta estrategia, se generó la cepa B. subtilis PERM2094.

Obtención y caracterización de una cepa de B. subtilis portando las construcciones pDR111-yhdA y pAX01-ywqN. Para generar una cepa capaz de sobreproducir simultáneamente las proteínas YhdA y YwqN, la cepa B. subtilis 1A751 lacA::pAX01-ywqN (PERM2109) fue transformada con la construcción pPERM2072 (pDR111-yhdA). Esta construcción se integra en el locus amyE del genoma de B. subtilis 1A751. La corroboración de las colonias transformantes se realizó mediante PCR amplificando los loci amyE y lacA empleando oligonucleótidos específicos (directo amyE 5'-GATCAAAAGCGGAACCATTCTTC-3' y reverso amyE, 5'-TTGAGCTCAATGGGGAAGAGAACCG-3'; directo, lacA 5'-GCTTGCATGGAGCGCACTTG-3' y reverso lacA 5'-GCGTTTCAAGAGGCTCAC-3'). Siguiendo esta estrategia, se generó la cepa B. subtilis PERM2113. Para generar una cepa control con los vectores pDR111 y pAX01 vacíos, la cepa B. subtilis 1A751 (PERM110) fue transformada con el vector pAX01 (pPERM2110). Esta construcción se integra en el locus lacA del genoma de B. subtilis 1A751. La corroboración de las colonias transformantes se realizó mediante PCR, con la ADN polimerasa Vent, amplificando el locus lacA empleando oligonucleótidos específicos: directo 5'-GCTTGCATGGAGCGCACTTG-3' y reverso 5'-GCGTTTCAAGAGGCTCAAC -3'. Siguiendo esta estrategia, se generó la cepa B. subtilis PERM2107. Posteriormente, la cepa PERM2107 (lacA::pAX01) fue transformada con el vector pDR111 (pPERM693). Esta construcción se integra en el locus amyE del genoma de B. subtilis 1A751. La corroboración de las colonias transformantes se realizó mediante PCR, amplificando los loci amyE y lacA empleando oligonucleótidos específicos (directo amyE 5'-GATCAAAAGCGGAACCATTCTTC-3' y reverso amyE 5'-TTGAGCTCAATGGGGAAGAGAACCGC-3'; directo lacA 5'-GCTTGCATGGAGCGCACTTG-3' y reverso lacA 5'-GCGTTTCAAGAGGCTCAAC-3'). Siguiendo esta estrategia, se generó la cepa B. subtilis PERM2145.

RESULTADOS

Para obtener una cepa de B. subtilis capaz de inducir la sobreexpresión simultánea de yhdA y ywqN, la cepa B. subtilis PERM2109 (lacA::pAX01-ywqN; Erm^R), se transformó con la construcción pDR111-yhdA (pPERM2072), generando la cepa B. subtilis PERM2113 (lacA::pAX01-ywqN amyE::pDR111-yhdA). Derivado del proceso de transformación, se seleccionaron colonias transformantes para la extracción del ADN genómico. La caracterización molecular de las colonias transformantes consistió en realizar una reacción de PCR usando oligonucleótidos específicos para el locus amyE y para el locus lacA, correspondientes a las regiones donde se integran las construcciones pDR111-yhdA y pAX01-ywqN, en el genoma de B. subtilis, mediante un evento de doble recombinación homóloga, respectivamente (Figura 12).

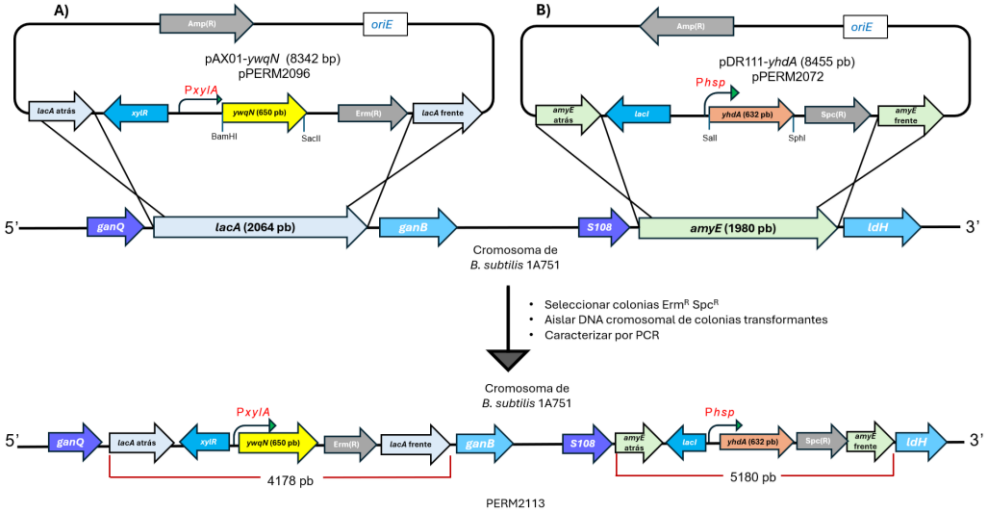


Figura 12. Estrategia experimental para generar una cepa de B. subtilis sobreexpresante de ywqN y yhdA (PERM2113). La obtención de la cepa PERM2113 ocurrió en dos eventos consecutivos de transformación: A) Empleando la construcción pPERM2096 (pAX01-ywqN), generando la cepa PERM2109; B) empleando la construcción pPERM2072 (pDR111-yhdA) sobre la cepa PERM2072, generando la cepa PERM2113. Cada una de las construcciones generadas se

integra, de manera independiente, en el locus correspondiente dentro del genoma de B. subtilis 1A751 mediante un evento de doble recombinación homóloga.

La obtención de un fragmento de PCR de 4178 pb, del ADN cromosómico, purificado de colonias transformantes resistentes a Erm, corroboró la integración de la construcción pAX01-ywqN en el locus lacA (Figura 13, carril 1-3). En contraste, el producto de PCR de 1,349 pb, obtenido de la cepa de B. subtilis 168 correspondió con el tamaño del locus lacA nativo (PERM311) (Figura 13, carril 5). Derivado del proceso de caracterización molecular, la colonia transformante 1 (carril 1, Figura 13 y Figura 14) se almacenó a -80 °C con el código B. subtilis PERM2113 para su posterior caracterización.

Los resultados del análisis de la integración de la construcción pDR111-yhdA y del vector vacio, en el locus amyE del genoma de las colonias mostradas en la Figura 1, generaron amplicones de 5,180 y 4,550 pb, respectivamente. Esto corroboró el reemplazo del gen amyE con la construcción sobreexpresante de yhdA y del vector pDR111; en apoyo de esta conclusión, la reacción de PCR, con ADN genómico de la cepa parental, generó una banda de 1,980 pb, que corresponde con el tamaño del gen amyE silvestre (Figura 14, carril 4).

La obtención de una cepa recombinante de B. subtilis que porta simultáneamente construcciones genéticas para sobreexpresar los genes ywqN y yhdA en los loci lacA y amyE, respectivamente, demuestra que las estrategias de clonación y transformación utilizadas fueron efectivas. La confirmación de la integración de las construcciones pDR111-yhdA y pAX01-ywqN en el genoma de B. subtilis garantiza su estabilidad genética. La construcción de esta cepa representa un paso fundamental para futuras evaluaciones funcionales orientadas a determinar si la sobreproducción simultánea de las proteínas YhdA y YwqN incrementa su capacidad para procesar la reducción del Cr(VI) y colorantes azoicos con la finalidad de utilizarla como una herramienta biotecnológica en la biorremediación de efluentes industriales contaminados con dichos agentes.

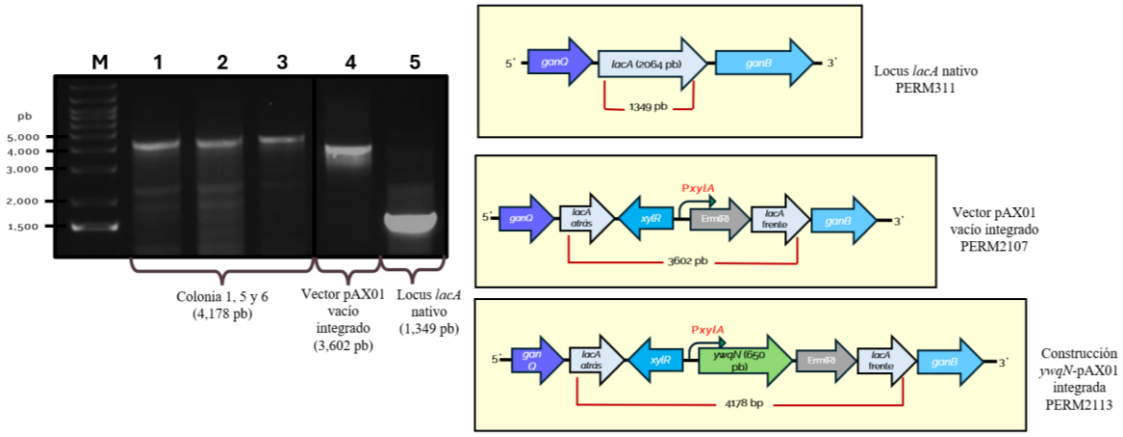


Figura 13. Caracterización molecular mediante PCR de colonias de B. subtilis 1A751 transformadas con la construcción pAX01-ywqN (PERM2113). Se emplearon los oligonucleótidos específicos dirigidos a la amplificación del locus lacA como parte de la corroboración molecular de las colonias transformantes. Carriles: M, marcador de peso molecular; 1, PCR colonia transformante 1; 2, PCR colonia transformante 5; 3, PCR colonia transformante 6; 4, PCR pAX01 vacío integrado en el locus lacA; 5, PCR locus lacA nativo usando ADN genómico de B. subtilis 168 (PERM311).

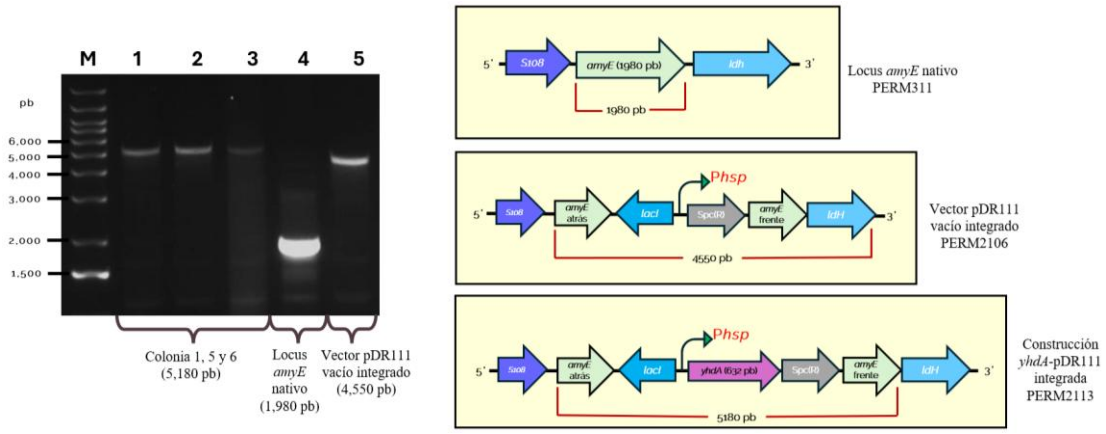


Figura 14. Caracterización molecular mediante PCR de colonias de B. subtilis 1A751 transformadas con la construcción pDR111-yhdA (PERM2113). Se emplearon los oligonucleótidos específicos dirigidos a la amplificación del locus amyE como parte de la corroboración molecular de las colonias transformantes. Carriles: M, marcador de peso molecular; 1, PCR colonia transformante 1; 2, PCR colonia transformante 5; 3, PCR colonia transformante 6; 4, PCR locus amyE nativo usando ADN genómico de B. subtilis 168 (PERM311); 5, PCR pDR111 vacío integrado en el locus amyE.

CONCLUSIONES

La optimización genética de una cepa de B. subtilis orientada hacia la sobreproducción simultánea de las proteínas YhdA y YwqN representa un avance significativo y prometedor dentro del ámbito de desarrollo de herramientas biotecnológicas aplicadas al tratamiento de contaminantes industriales. Este trabajo permitió la generación y caracterización molecular de una cepa recombinante de B. subtilis con la capacidad de sobreproducir simultáneamente ambas proteínas con la finalidad de potenciar su capacidad enzimática para la reducción de Cr(VI) y la degradación de colorantes azoicos presentes en efluentes industriales. En la actualidad se evalua la eficiencia de la cepa recombinante para operar sobre los agentes de interés, Cr(VI) y colorantes azoicos, además se estimará su eficacia en condiciones reales, es decir, al usar efluente proveniente de la industria de la curtiduría. De igual manera, será importante evaluar los efectos que la sobreproducción de ambas proteínas, YhdA y YwqN, pudieran ocasionar sobre la fisiología de B. subtilis.

En conjunto, este proyecto contribuye al desarrollo de tecnologías sustentables para el tratamiento de efluentes industriales de la curtiduría y fomenta bases para futuras aplicaciones en el ámbito ambiental e industrial del uso de herramientas de origen biológico.

Agradecimientos. Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) mediante el proyecto CBF2023-2024-708, y por la beca de maestría otorgada a M., L.-M. El proyecto también fue apoyado por el subsidio CIIC 219/2026 de la UG.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bafana, A., Devi, S. S. and Chakrabarti, T. (2011). Azo dyes: past, present and the future. Environ. Rev., 19, 350–370. DOI: 10.1139/A11-018
2. Binter, A., Staunig, N., Jelesarov, I., Lohner, K., Palfey, B. A., Deller, S., Gruber, K. and Macheroux, P. (2009). A single intersubunit salt bridge affects oligomer ization and catalytic activity in a bacterial quinone reductase. FEBS J, 276(18), 5263–5274. DOI: 10.1111/j.1742-4658.2009.07222.x
3. Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzmán, J. C., and Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions of chromium with microorganisms

and plants. FEMS Microbiology Reviews, 25(2001), 335-327. DOI: 10.1016/S0168-6445(01)00057-2
4. Chung, K. T. (2016). Azo dyes and human health: A review. J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol, 34(4):233-261. doi: 10.1080/10590501.2016.1236602
5. Cutting, S. M., & Vander Horn, P. B. (1990). Genetic analysis. In C. R. Harwood & S. M. Cutting (Eds.), Molecular biological methods for Bacillus (pp. 27–74). John Wiley & Sons.
6. Deller, S., Macheroux, P. and Sollner, S. (2008). Flavin-dependent quinone reductases. Cell. Mol. Life Sci., 65(1), 141–160. DOI: 10.1007/s00018-007-7300-y
7. Deller, S., Sollner, S., Trenker-El-Toukhy, R., Jelesarov, I., Gübitz, G. M. and Macheroux, P. (2006). Characterization of a Thermostable NADPH:FMN Oxidoreductase from the Mesophilic Bacterium Bacillus subtilis. Biochemistry, 45, 7083-7091. DOI: 10.1021/bi052478r
8. Errington, J. and van der Aart, L. T. (2020). Microbe Profile: Bacillus subtilis: model organism for cellular development, and industrial workhorse. Microbiology, 166, 425–427. DOI: 10.1099/mic.0.000922
9. Feng, J., Cerniglia, C. E. and Chen, H. (2012). Toxicological significance of azo dye metabolism by human intestinal microbiota. Frontiers in Bioscience, 4(2), 568-586. DOI: 10.2741/e400
10. Gibb, H. J., Lees, P. S., Pinsky, P. F. and Rooney, B. C. (2000). Lung cancer among workers in chromium chemical production. Am J Ind Med, 38(2), 115-26. DOI: 10.1002/1097-0274(200008)38:2<115::aid-ajim1>3.0.co;2-y
11. González, B. R., Ramírez, N., Abundiz-Yáñez, K., Ayala-García, V. M., Valenzuela-García, L. I., Robleto, E. A., Pedraza-Reyes, M. (2026). A Potent Quinone Reductase Encoded by ywqN (Qnr1) Protects Bacillus subtilis from Oxygen Radical Genotoxicity. Molecules, 31(4), 701. DOI: 10.3390/molecules31040701
12. Gutiérrez-Corona, J. F., Romo-Rodríguez, P., Santos-Escobar, F., Espino-Saldaña, A. E. and Hernández-Escoto, H. (2016). Microbial interactions with chromium: basic biological processes and applications in environmental biotechnology. World J Microbiol Biotechnol, 32(191). DOI: 10.1007/s11274-016-2150-0
13. Itoh, M., Nakamura, M., Suzuki, T., Kawai, K., Horitsu, H. and Takamizawa, K. (1995). Mechanism of chromium(VI) toxicity in Escherichia coli: is hydro gen peroxide essential in Cr(VI) toxicity? J. Biochem. 117(4), 780–786. DOI: 10.1093/oxfordjournals.jbchem.a124776
14. Liu, K. J. and Shi, X. (2001). In vivo reduction of chromium(VI) and its related free radical generation. Mol. Cell. Biochem. 222, 41–47. DOI: 10.1023/A:1017994720562.
15. Nur-E-Alam, M., Mia, M.A.S., Ahmad, F., and Rahman, M. M. (2020). An overview of chromium removal techniques from tannery effluent. Appl Water Sci 10, 205. DOI. 10.1007/s13201-020-01286-0.
16. Ramli, N. N., Othman, A. R., Said, N. S. M., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Ismail, N. I. and Kurniawan, S. B. (2025). Chromium reduction by indigenous Bacillus sp. isolate S1: optimal performance, characterization, and pathway. International Journal of Environmental Science and Technology, 22, 15045–15056. DOI: 10.1007/s13762-025-06606-y
17. Sambrook, J., Fritsch, E. F., Maniatis, T. (1989). Molecular cloning: a laboratory manual, 2nd ed. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, NY.
18. Sambrook, J., Russell, D. W. (2001). Molecular cloning: a laboratory manual, 3nd ed. Cold Spring Harbor Laboratory, Cold Spring Harbor, NY.
19. Santos-Escobar, F., Leyva-Sánchez, H. C., Ramírez-Ramírez, N., Obregón-Herrera, A. and Pedraza-Reyes, M. (2019). Roles of Bacillus subtilis RecA, Nucleotide Excision Repair, and Translesion Synthesis Polymerases in Counteracting Cr(VI)-Promoted DNA Damage. J Bacteriol 201:e00073-19. DOI: 10 .1128/JB.00073-19
20. Shi, X. and Dalal, N. S. (1994). Generation of hydroxyl radical by chromate in biologically relevant systems: role of Cr(V) complexes versustetraperoxo chromate(V). Environ. Health Perspect. 102, 231–236. DOI: 10.1289/EHP.94102S3231
21. Spizizen, J. (1958). Transformation of biochemically deficient strains of Bacillus subtilis by deoxyribonucleate. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.; 44(10); 1072-1078. DOI: 10.1073/pnas.44.10.1072
22. Su, Y., Liu, C., Fang, H. and Zhang, D. (2020). Bacillus subtilis: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. Microb Cell Fact, 19, 173. DOI: 10.1186/s12934-020-01436-8

23. Tadesse, G. L. and Guya, T. L. (2017). Impacts of Tannery Effluent on Environments and Human Health: A Review Article. Advances in Life Science and Technology, 54(2017), 58-67. ISSN: 2225-062X.
24. Valenzuela-García, L. I., Zapata, B. L., Ramírez-Ramírez, N., Huchin-Mian, J. P., Robleto, E. A., Ayala-García, V. M., Pedraza-Reyes, M. (2020). Novel biochemical properties and physiological role of the flavin mononucleotide oxidoreductase YhdA from Bacillus subtilis. Appl Environ Microbiol 86:e01688-20. DOI: 10.1128/AEM.01688-20.
25. Vidal, L. S., Kelly, C. L., Mordaka, P. M. and Heap, J. T. (2018). Review of NAD(P)H-dependent oxidoreductases: Properties, engineering and application. BBA- Proteins and Proteomics, 1866, 327-347. DOI: 10.1016/j.bbapap.2017.11.005
26. Wakeel, A., Xu, M. and Gan, Y. (2020). Chromium-Induced Reactive Oxygen Species Accumulation by Altering the Enzymatic Antioxidant System and Associated Cytotoxic, Genotoxic, Ultrastructural, and Photosynthetic Changes in Plants. Int. J. Mol. Sci. 2020, 21, 728. DOI:10.3390/ijms21030728
27. Yuan, H., Chen, L., Cao, Z. and Hong, F. F. (2020). Enhanced Decolourization Effi ciency of Textile Dye Reactive Blue 19 in a Horizontal Rotating Reactor Using Strips of BNC-Immobilized Laccase: Optimization of Conditions and Comparison of De colourization Efficiency. Biochemical Engineering Journal, 156, Article 107501. DOI: 10.1016/j.bej.2020.107501
28. Zheng, Z., Li, Y., Zhang, X., Liu, P., Ren, J., Wu, G., Zhang, Y., Chen, Y. and Li, X. (2015). A Bacillus subtilis strain can reduce hexavalent chromium to trivalent and an nfrA gene is involved. International Biodeterioration & Biodegradation, 97, 90-96. DOI: 10.1016/j.ibiod.2014.10.017

PROTOCOLO PARA LA PUNCION SANGUINEA EN VENA BRANQUIAL DE *Ambystoma Mexicanum* BAJO CUIDADO PROFESIONAL

Rufino Osorio Márquez[1,2], Maricela Duran Ríos[2], Valeria Scarlet Reyes Rangel[1], María Dolores Claudia Guzmán Lara[2], Vania Isabel González Luna[3], Cecilia Molina López[2].

[1] Parque Zoológico Benito Juárez de Morelia, [2]Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, [3] Exotic Vet.
rufino.osorio@umich.mx

RESUMEN

El Ambystoma mexicanum es anfibio con importancia científico y cultural que actualmente se encuentra en peligro de extinción, esta especie es originaria del lago de Xochimilco, sin embargo, actualmente existen diversas colecciones bajo cuidado profesional con la finalidad de conservación ex situ, o bien como tenencia particular (mascota no convencional). En el presente trabajo se llevó a cabo un protocolo para la toma de muestras sanguíneas en n= 4 individuos de Ambystoma mexicanum bajo cuidado profesional realizado en los meses de septiembre-octubre del 2025, esto con la finalidad de contar con un protocolo estandarizado que permita el diagnóstico temprano y el manejo preventivo de esta especie. Se trabajó con cuatro ejemplares clínicamente sanos, a los que se les realizó la técnica de punción en vena branquial, el protocolo se llevó a cabo en cuatro fases, la primera es la preparación pre-muestreo donde se realizó una evaluación clínica inicial del individuo (24 horas antes), se llevó a cabo la revisión de parámetros ambientales (pH, temperatura, nitritos, nitratos), un ayuno controlado de 12-18 horas y la preparación de un área de trabajo estéril; como segunda fase la preparación anestésica para ello se utilizó esencia de clavo (eugenol) a una dosis de 30 gotas/3L de agua, a un tiempo de 15-20 minutos hasta perdida de reflejos del individuo; como tercera fase la toma de muestra sanguínea se realizó en una de las venas branquiales mediante punción con jeringa de 1 ml y agujas 25G-27G, cuidando no exceder la cantidad de máxima de sangre equivalentes al 0.5% del peso corporal, la cual se recolectó en tubos microtainer con heparina de litio, esta fase no duró más de cinco minutos; como última fase, el procesamiento y análisis de los resultados se llevó a cabo en el laboratorio donde se revisaron 18 parámetros bioquímicos, conteo diferencial de leucocitos y estudios coproparasitoscópicos. Se registraron los tiempos de recuperación y se monitoreó hasta 72 horas a los ejemplares, los cuáles mostraron una recuperación que osciló de 20-73 minutos, se identificaron problemas de salud con el apoyo de los parámetros bioquímicos y se relacionaron con los factores ambientales revisados previamente. Este estudio mostró tener la viabilidad técnica del protocolo para extracción de muestra sanguínea, mínimamente invasivo, enfocado a la detección temprana de alteraciones subclínicas en la población de ajolotes, permitiendo así mismo el establecimiento de valores de referencia hematológicos-bioquímicos que contribuyen a la mejora continua en las técnicas de manejo y monitoreo.

INTRODUCCIÓN

El género Ambystoma abarca un total de 33 especies que se distribuyen desde el norte de América hasta el sur de México, de estas especies 17 se encuentra en México. Ambystoma mexicanum ha sido ampliamente estudiado debido a la gran capacidad regenerativa de sus tejidos. (Hernández, 2022). Ambystoma mexicanum es un anfibio que actualmente se encuentra en peligro de extinción debido a los grandes cambios en su hábitat natural (lago de Xochimilco en la ciudad de México) sin embargo se han llevado a cabo grandes esfuerzos para mantenerlos en condiciones de cuidado humano (profesional) en acuarios, zoológicos, UMAS y actualmente como mascota no convencional, de tal manera que es una especie que se suele encontrar con frecuencia creciente en la consulta médica de animales no convencionales; ello hace que sea necesaria la especialización en su

fisiología, parámetros de calidad del agua, nutrición, enfermedades comunes, manejo en general así como valores hematológicos.

A pesar de los diversos estudios que se realizan con esta especie, la mayoría enfocados en la capacidad regenerativa de sus tejidos, no existe mucha investigación con respecto de sus valores hematológicos, de igual manera la literatura actual tiene ciertas discrepancias con respecto a la descripción de las estirpes celulares de estos individuos. Tomando en cuenta esta cuestión, se ha llevado a cabo este trabajo con la finalidad de contar con un protocolo que sirva de base para el manejo sin riesgos de muerte o estrés en estos ejemplares, que se encuentren en diversas colecciones faunísticas. Al realizar una punción sanguínea adecuada, se disminuyen los riesgos que pudieran afectar al individuo, así como los cambios fisiológicos que se pudieran manifestar en los diversos analitos sanguíneos como el microhematocrito, las proteínas totales o los leucocitos.

Así mismo se garantiza la cadena de custodia para la obtención de datos estadísticos confiables al realizar el análisis de los datos obtenidos en la bioquímica sérica, hemograma y conteo porcentual de leucocitos.

TEORÍA

El ajolote mexicano o Ambystoma mexicanum se encuentra en peligro crítico de extinción (NOM-059-SEMARNAT-2010). Es por ello que para su conservación y manejo es importante contar con parámetros bioquímicos y hematológicos objetivos, los cuales serán las bases para la detección de procesos patológicos, así mismo estos valores se pueden correlacionar con los parámetros de calidad de agua y los resultados de los exámenes físicos.



Figura 1. Ejemplar juvenil de Ambystoma mexicanum
Fuente: Elaboración propia.

Los estudios hematológicos en esta especie son escasos, dentro de la literatura podemos encontrar los realizados por Anaya y Morales en Perú (2021), Olascoaga et al, (2021) en la ciudad de México y Takami (2017), en Japón.

En determinados casos los autores comparten ciertos valores, sin embrago son un poco más las diferencias que las coincidencias, de hecho, en los dos estudios más recientes que datan del año 2021, uno realizado por Olascoaga y colaboradores en el zoológico de Chapultepec y el otro realizado en Perú por Anaya y Morales, ambos con Ambystoma mexicanum bajo cuidado humano, encontramos algunas variables que no coinciden. En el caso de Olascoaga y colaboradores mencionan la presencia de una línea celular llamada melanomacrofagos, el cual no aparece en el estudio de Anaya y Morales, en el cual ellos mencionan dos líneas más, que son los heterófilos (leucocitos granulocitos presentes en diversas especies de aves, reptiles y peces) y los azurófilos (Agranulocitos que se han reportado en varias especies de serpientes y que algunos autores los asocian a los monocitos). Cabe mencionar también que en la caracterización morfológica de Anaya y Morales (2021) no se mencionan los neutrófilos como parte del hemograma de esta especie. Resulta necesario realizar estudios hematológicos para corroborar o descartar la presencia de estas tres líneas celulares antes mencionadas, así como describir sus afinidades tintoriales, recordemos

que existen células basofilicas, acidófilas o azurófilas, pero también revisando de manera muy particular la forma de los gránulos presentes (redondas en el caso de los eosinófilos, elongadas en el caso de los heterófilos). Esto permite en un primer momento realizar la caracterización morfológica y tintorial usando colorante Wright y Hemocrom de Hycell y en un segundo momento evaluar los valores de referencia de estas células como lo es la media, error estándar de la media, rango, desviación estándar, intervalos de confianza de la media y la proporción.

Para poder realizar los estudios hematológicos es importante implementar un buen manejo físico de estas especies para evitar la cardiomiopatía por captura (Blumstein, et al, 2015), es decir evitar el estrés, los traumatismos o daños al individuo.

Al evitar el estrés se obtienen resultados más objetivos, sobretodo en el caso de los valores de linfocitos.

Se ha documentado que en este tipo de especies se puede recolectar un volumen sanguíneo equivalente al 1% de su peso corporal (Walberg, 2001)

Los valores hematológicos en una especie pueden variar de acuerdo a condiciones ambientales como la altitud, la temperatura, la nutrición y las condiciones generales del individuo como edad, sexo o la presencia de padecimientos, (Gonzales, 2020). En el caso del genero Ambystoma se tiene que tomar en cuenta los parámetros del agua.

Para el manejo de los Ambystomas se han utilizado diversas soluciones para la sedación como el Isoflurano (Olascoaga, et al 2012), Eugenol (U.S.P. 926) con una pureza del 95.5% (Anaya y Morales, 2021), metanosulfonato de 3-aminobenzoato de etilo al 0,2 % (Takami, 2017). La sedación adecuada permite el manejo físico y una punción sanguínea más acertada debido a la disminución de movimientos bruscos.

Para la punción sanguínea se recomienda la vena branquial ya que es la que al momento de la manipulación resulta más visible, (Gastelum, 2018)



Figura 2. Posición de la vena branquial en Ambystoma.
Fuente. Elaboración propia

PARTE EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en la Clínica para animales silvestre no convencionales denominado Exotic Vet, localizado en Mérida, Yucatán, México, durante septiembre-octubre del 2025.

Las tomas de muestras se realizaron a n=4 ejemplares de Ambystoma mexicanum que se encontraban bajo cuidado profesional (dos machos y dos hembras).

El protocolo se llevó a cabo en cuatro fases, la primera es la preparación pre-muestreo donde se realizó una evaluación clínica inicial del individuo (24 horas antes), se llevó a cabo la revisión de parámetros ambientales (pH, temperatura, nitritos, nitratos), un ayuno controlado de 12-18 horas y la preparación de un área de trabajo estéril; como segunda fase la preparación anestésica, para ello se utilizó esencia de clavo (eugenol) a una dosis de 30 gotas/3L de agua, a un tiempo de 15-20 minutos hasta perdida de reflejos del individuo; como tercera fase la toma de muestra sanguínea se realizó en una de las venas branquiales mediante punción con jeringa de 1 ml y agujas 25G-27G,

cuidando no exceder la cantidad de máxima de sangre equivalentes al 0.5% del peso corporal, la cual se recolectó en tubos microtainer con heparina de litio, esta fase no duró más de cinco minutos; como última fase, el procesamiento y análisis de los resultados se llevó a cabo en el laboratorio donde se revisaron 18 parámetros bioquímicos, conteo diferencial de leucocitos y estudios coproparasitoscópicos.



Figura 3. Asepsia y punción
Fuente: Elaboración propia



Figura 4. Recolección de la sangre
Fuente: Elaboración propia

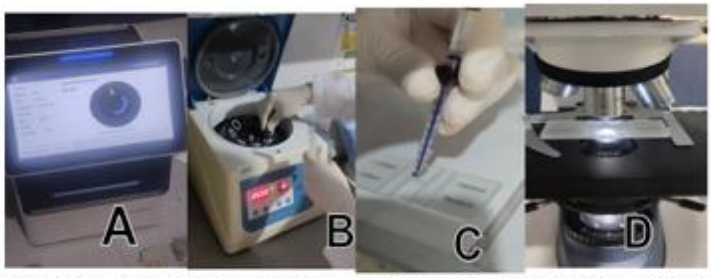


Figura 5. Análisis de las muestras sanguíneas; A Bioquímica, B Microhematocrito, C Preparación cámara de Neubahuer con solución Natt-Herricks, D conteo de Leucocitos.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los ejemplares mostraron una recuperación que osciló de 20-73 minutos, se identificaron problemas de salud con el apoyo de los parámetros bioquímicos y se relacionaron con los factores ambientales revisados previamente.

Ejemplar	Sedación	Muestreo	Recuperación
1	20 min	15 min	20 min
2	20 min	2 min	73 min
3	18 min	2 min	21 min
4	24 min	4 min	54 min

Tabla 1. Evolución de Tiempos Operativos
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la tabla 1 que conforme se practicó el manejo y punción del ejemplar el tiempo de muestreo disminuyó de 15 a 4 minutos.

Ejemplar	Calidad de agua	Tiempo de recuperación/complicaciones
Ejemplar 3	Optima	21 minutos/mínimas
Ejemplar 4	Deficiente (nitritos positivos: 0.8 mg/L)	54 minutos/severas

Tabla 2. Calidad de agua vs hallazgos clínicos
Fuente: Elaboración propia

La calidad del agua resalta como factor importante, ya que, si se cuentan con parámetros deficientes, el tiempo de recuperación de los ejemplares suele aumentar.

Características del ejemplar	Alteraciones bioquímicas	Alteraciones en hemograma	Coprológico
1.- Macho 2 años 5 meses, 130 g de peso, 20.5 cm de longitud	-TP:13.0 g/L -GLU: 8.06 mmol/L -Na+: <110 mmol/L	50% linfocitos 9.91% eritroblastos	Juveniles de Anisakis sp
2.- Hembra, 2 años 5 meses, 140g, 23 cm de longitud	- TP: 16.0 g/L - GLU: 5.70 mmol/L - GLOB: 8.8 g/L	53% linfocitos 45.28 % de microhematocrito	Trofozoítos de Herpetomonas sp +
3.-Macho, 5 años 7 meses, 130g, 24 cm de longitud	- CK: 460.1 U/L - LDH: 663.2 U/L - GLU: 6.45 mmol/L	54% linfocitos 7.41% eritroblastos	Quistes de Entamoeba histolytica/dispar, Trofozoítos de Trichomonas spp, Huevos de Ascaridos.
4.-Hembra, 2 años 6 meses, 130g, 24 cm de longitud	- TP: 20.5 g/L - LDH: 1002.5 U/L - GLOB: 11.1 g/L	14% de Melanomacrofagos	Negativo a parásitos, aumento bacteriano, consistencia liquida.

Tabla 3. Características de los ejemplares Vs valores hematológicos y parasitológicos.

Los resultados bioquímicos de importancia por su alteración (con respecto a lo reportado por Lavalle y Morales (2021) son las proteínas totales y LDH por encima de los valores de referencia, así como hipoglucemia en los cuatro ejemplares revisados, esto debido al ayuno previo al manejo, de vital importancia resulta mencionar que se observó algún tipo de parasitosis en 3 de los cuatro ejemplares muestreados. En el caso del hemograma, los valores porcentuales de linfocitos se encuentran ligeramente elevados, de los eritroblastos no se cuentan con valores descritos, cabe mencionar que únicamente en el ejemplar numero 4 se encontró la presencia de los leucocitos denominados melanomacrofagos (un 14%, esto debido a algún proceso inflamatorio, infeccioso o estrés ya que también las globulinas se encuentran aumentadas en este ejemplar).

CONCLUSIONES

Este estudio mostró tener la viabilidad técnica del protocolo para extracción de muestra sanguínea, mínimamente invasivo, enfocado a la detección temprana de alteraciones subclínicas en la población de ajolotes, permitiendo así mismo el establecimiento de valores de referencia hematológicos-bioquímicos que contribuyan a la mejora continua en las técnicas de manejo y monitoreo en esta especie.

BIBLIOGRAFÍA

1. 59-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo
2. Barriga V. C. “Evaluación de indicadores bioquímicos de estrés y contaminación en salamandras del género Ambystoma (Caudata: Ambystomatidae) de los estados de Coahuila y Nuevo León”. Tesis para la obtención de grado de Dr. (Universidad Autónoma de Nuevo León, 2021) pp 6-8
3. De la Peña S. L. “Determinación de la cinética hematológica de Ambystoma mexicanum durante procesos inflamatorios e infecciosos” Informe de Servicio Social. (Universidad Autónoma de México campus Xochimilco, 2021). pp. 6-7
4. Gastélum Máynez, M. G., *Manual de prácticas de inmunología veterinaria*, Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, 2021.
5. Gastélum. Manual de prácticas de inmunología Veterinaria. (2021) Tesis para obtención de grado. Universidad de Guadalajara.
6. Hawkey, C. M., Dennett, T. B., *Atlas de Hematología Veterinaria Comparada: Células Sanguíneas Normales y Anormales en Mamíferos, Aves y Reptiles*, 1.ª ed., Madrid: Grass, 1989, p. 250.
7. Olascoaga-Elizarraraz, A., Servín Zamora, E., Nogueira Marmolejo, M. G., Ojeda Chávez, J., Alcaraz Sosa, L. E., Díaz Negrete, M. T., López Montaño, M., Ducoing Watty, A., Majluf Trejo, A. D., Maldonado-Reséndiz, R. I., “Estimación de parámetros hematológicos en ajolote de Xochimilco (Ambystoma mexicanum) bajo cuidado humano en el Zoológico de Chapultepec, México,” *Rev. Latinoam. Herpetol.*, Vol. 4, No. 1, 2021, pp. 95–104. https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2021.1.198
8. Soto Piñeiro, C. J., Acosta Guevara, I., Cruz López, E., “Parámetros hematológicos de Cotorras (Amazona leucocephala) y Cateyes (Aratinga euops),” *REDVET. Rev. Electrón. Vet.*, Vol. 10, No. 7B, 2009, pp. 1–10.
9. Takami Y, Une Y. Bioquímica clínica sanguínea y hematocrito del ajolote mexicano (Ambystoma mexicanum). Journal of Herpetological Medicine and Surgery . 2017 Nov;27(3-4):104–110. doi:10.5818/16-10-091.1
10. Thoresen, S. I., Arnemo, J. M., y Liberg, O., “Hematology and serum clinical chemistry reference intervals for free-ranging Scandinavian gray wolves (Canis lupus),” *Vet. Clin. Pathol.*, Vol. 38, No. 2, 2009, pp. 224–229.
11. Ventimiglia, F. D., Rivas-Ibargüen, M. A., Vildoza, A., y Orsilles, M. Á., “Valor diagnóstico de la morfología eritrocitaria en las anemias,” *Acta Bioquím. Clínica. Latinoamericana.*, Vol. 51, No. 3, 2017, pp. 379–386.

TRATAMIENTO SOSTENIBLE DE LACTOSUERO MEDIANTE *Geobacter Sulfurreducens* EN UN SISTEMA TIPO CELDA MICROBIANA

Lesli Daniela Bayardo-Alvarez[1]; Virginia Villa-Cruz[1]; J. Elizabeth Alba-Cuevas[1]; Manuel Alejandro Tejeda-Martín[1]; Xochitl Aparicio-Fernández[1]; Rita Patakfalvi[1]; Gilber Vela-Gutiérrez[2] y Bertha Alicia Arce-Chávez[1].

[1]Centro Universitario de los Lagos. Universidad de Guadalajara, [2]Facultad de Ciencias de la Nutrición y Alimentos. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

lesli.bayardo9957@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Este trabajo evaluó un método biológico para el tratamiento sostenible de lactosuero de queso fresco procedente de Lagos de Moreno, Jalisco. El residuo se empleó como sustrato para *Geobacter sulfurreducens* en celdas de combustible microbianas de doble cámara a circuito abierto durante 30 días. Se compararon tres tratamientos: lactosuero estéril con *G. sulfurreducens*, lactosuero no estéril con *G. sulfurreducens* y lactosuero no estéril. Se determinaron pH, acidez, lactosa, grasa, proteína, sólidos totales y Demanda química de oxígeno (DQO), al inicio y al final del proceso. Los resultados demostraron una remoción significativa de la carga orgánica y los sólidos totales. La eficiencia fue marcadamente mayor en el tratamiento no estéril, evidenciando que la microbiota nativa no limitó el proceso, sino que favoreció la degradación de la materia orgánica. Los hallazgos respaldan la factibilidad de emplear esta configuración biológica como una alternativa biotecnológica eficiente para mitigar el impacto ambiental del lactosuero regional.

INTRODUCCIÓN

La industria láctea genera grandes volúmenes de lactosuero a nivel mundial, estimándose que por cada kilogramo de queso elaborado se producen entre 9 y 10 litros de este subproducto. Prazeres et al. (2012) y Carvalho et al. (2013) señalan que el lactosuero constituye uno de los principales residuos de la industria quesera debido a los elevados volúmenes generados y a su alta carga orgánica. De acuerdo con el *USDA Foreign Agricultural Service* (2024), la producción de queso en México durante 2024 se estimó en 474,000 toneladas métricas, lo que representa una generación potencial superior a los 4 mil millones de litros de lactosuero al año. Asimismo, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2024) reportó que Jalisco concentra aproximadamente el 21 % de la producción nacional de leche, se puede destacar el municipio de Lagos de Moreno como una de las principales cuencas lecheras del país debido a la presencia de numerosas queserías industriales y familiares.

A pesar de que existen diversas alternativas para su aprovechamiento, incluyendo la producción de proteína de suero (whey protein), bioetanol y suplementos para alimentación animal, una proporción importante de este efluente continúa siendo descargada sin un tratamiento adecuado (Prazeres et al., 2012; Carvalho et al., 2013). Según Tugume et al. (2025), esta práctica representa un desafío ambiental importante debido a la elevada concentración de materia orgánica presente en el lactosuero. Desde el punto de vista ambiental, este subproducto se caracteriza por presentar altos valores de DQO, los cuales pueden provocar procesos de eutrofización cuando son descargados directamente en cuerpos de agua (Carvalho et al., 2013). Como consecuencia, se favorece el crecimiento excesivo de algas y microorganismos, disminuye la concentración de oxígeno disuelto y se generan alteraciones significativas en los ecosistemas acuáticos (Prazeres et al., 2012).

Con el objetivo de mitigar estos impactos, se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento; sin embargo, los métodos físicos y químicos suelen presentar elevados costos operativos o generar residuos secundarios que requieren disposición adicional (Tugume et al., 2025). En este contexto,

los tratamientos biológicos anaerobios representan una alternativa más sostenible y ambientalmente favorable (Carvalho et al., 2013). Entre las tecnologías emergentes destacan las Celdas de Combustible Microbianas (CCM), sistemas bioelectroquímicos capaces de remover materia orgánica y recuperar energía eléctrica simultáneamente mediante la actividad metabólica de microorganismos electroactivos (Logan et al., 2019; Santoro et al., 2017). Particularmente, *G. sulfurreducens* ha sido ampliamente estudiado debido a su capacidad para transferir electrones extracelularmente y participar en procesos de biorremediación y generación de bioelectricidad (Lovley, 2012; Logan, 2009). En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el potencial de *G. sulfurreducens* para el tratamiento biológico de lactosuero mediante una celda de combustible microbiana de doble cámara operada en circuito abierto, analizando su capacidad para favorecer la remoción de materia orgánica, promover el crecimiento microbiano y contribuir a la valorización sostenible de este subproducto agroindustrial.

TEORÍA

Las Celdas de Combustible Microbianas de doble cámara son sistemas bioelectroquímicos constituidos por una cámara anódica y una cámara catódica separadas por una membrana de intercambio de protones (Santoro et al., 2017; Rabaey y Verstraete, 2005). Según Logan et al. (2019), estos sistemas permiten transformar la energía química almacenada en la materia orgánica en energía eléctrica mediante la actividad metabólica de microorganismos electroactivos. Durante la operación convencional en circuito cerrado, los microorganismos oxidan la materia orgánica presente en la cámara anódica y transfieren los electrones generados hacia el cátodo a través de un circuito externo, produciendo corriente eléctrica (Logan, 2009; Liu et al., 2004).

Lovley (2012) describe que microorganismos como *G. sulfurreducens* poseen mecanismos especializados de transferencia electrónica extracelular que les permiten utilizar superficies conductoras como aceptores finales de electrones. Sin embargo, cuando la CCM opera en circuito abierto, el flujo de electrones entre ánodo y cátodo se interrumpe completamente. De acuerdo con Lovley y Nevin (2011), la ausencia de un aceptor externo de electrones limita significativamente los procesos de transferencia electrónica extracelular y restringe la respiración anaerobia asociada al electrodo.

Bajo estas condiciones, la degradación de la materia orgánica depende principalmente de rutas metabólicas anaerobias alternativas y de procesos fermentativos desarrollados por la comunidad microbiana presente en el sistema. Lovley (2017) señala que las interacciones microbianas dentro de comunidades complejas pueden favorecer la transformación de compuestos orgánicos mediante mecanismos cooperativos de intercambio metabólico. Por esta razón, la operación en circuito abierto constituye una estrategia experimental ampliamente utilizada para evaluar la capacidad intrínseca de degradación biológica de un sistema sin la influencia de la generación de corriente eléctrica (Kim et al., 2011; Logan et al., 2006). En consecuencia, este enfoque permite determinar de manera más precisa la remoción de materia orgánica mediante indicadores como la DQO, aislando el efecto de la actividad bioelectroquímica sobre el desempeño global del tratamiento.

PARTE EXPERIMENTAL

MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL SUSTRATO

Se recolectaron muestras de lactosuero en siete queserías del municipio de Lagos de Moreno, Jalisco, México. El efluente se transportó y almacenó en refrigeración a 4℃ hasta su uso. Posteriormente, se conformó una mezcla homogénea (*pool*) con volúmenes equivalentes de cada muestra para obtener un sustrato representativo de la producción regional.

A partir de este *pool*, se establecieron tres tratamientos experimentales:

- **Tratamiento A:** lactosuero esterilizado, pH 6.0, inoculado con *G. sulfurreducens*.
- **Tratamiento B:** lactosuero no esterilizado, inoculado con *G. sulfurreducens.*
- **Tratamiento C (Control/Blanco):** lactosuero no esterilizado.

La esterilización se llevó a cabo en autoclave a 121℃ (15 psi) durante 15 min. El ajuste de pH en el Tratamiento A se realizó por potenciometría mediante la adición de NaOH 1 M o HCl 1 M según correspondiera, utilizando un potenciómetro calibrado.

Preparación del inóculo e inoculación

Se empleó la bacteria anaerobia *G. sulfurreducens* como agente biológico de degradación. Previo a la inoculación, el cultivo se incubó a 30℃ para asegurar su activación metabólica. La concentración y viabilidad celular del inóculo fueron determinadas mediante un contador celular CytoSMART Corning®, basado en análisis digital de imágenes. El recuento celular se realizó mediante el software Cell Counter y, adicionalmente, la incorporación de azul de tripano permitió al mismo sistema distinguir y cuantificar células viables y no viables de manera automática, proporcionando una evaluación integral de la calidad del inóculo previo a su inoculación en la celda de combustible microbiana. La inoculación se realizó bajo condiciones de estricta anaerobiosis directamente en la cámara anódica de la celda de combustible microbiana (CCM), adicionando 10 µL de inóculo por cada 100 mL de sustrato, correspondiente únicamente a los tratamientos A y B.

Evaluación en celdas de combustible microbianas (CCM)

Los tres tratamientos se evaluaron simultáneamente en reactores tipo CCM de doble cámara, operados bajo la configuración de circuito abierto durante un periodo de 30 días. Al inicio y al final del proceso, se realizaron muestreos para evaluar las variaciones fisicoquímicas analítica: DQO, pH, acidez, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales (ST), sólidos disueltos totales (SDT), proteína, grasa y lactosa. Las muestras fueron sometidas a centrifugación a 500 rpm durante 30 minutos para favorecer la separación de biomasa y partículas suspendidas. Las muestras del día 30, después de la centrifugación fueron microfiltrados con jeringa estériles de polietersulfona (PES) con poro de 0.22 µm y diámetro de membrana de 33 mm.

Consideraciones experimentales

Todas las etapas de inoculación se realizaron bajo condiciones anaerobias con el fin de evitar la presencia de oxígeno y favorecer la actividad metabólica de *G. sulfurreducens*. Asimismo, se mantuvieron condiciones controladas de bioseguridad y trazabilidad experimental durante todo el estudio, registrando la información obtenida en bitácoras de seguimiento para garantizar la reproducibilidad de los resultados.
Se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier utilizando un equipo MilkoScan FT1. La DQO fue determinada mediante el método de reflujo cerrado colorimétrico descrito en el método 5220 D de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA y WEF). Las muestras fueron sometidas a digestión térmica y posteriormente analizadas mediante lectura fotométrica para cuantificar la concentración de materia orgánica oxidable presente en el medio. Los parámetros de pH y acidez fueron determinados mediante potenciometría y titulación automatizada, respectivamente. Los sólidos totales, suspendidos y disueltos se cuantifican mediante métodos gravimétricos estandarizados (NMX-AA-034-SCFI-2015).

RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidenciaron que el tratamiento conformado por lactosuero no esterilizado inoculado con *G. sulfurreducens* presentó el mejor desempeño global entre los tratamientos evaluados, alcanzando las mayores eficiencias de remoción de materia orgánica y un crecimiento microbiano sostenido durante los 30 días de operación. Este comportamiento sugiere que la presencia de la microbiota nativa del lactosuero favoreció el establecimiento de interacciones metabólicas que incrementan la degradación de los compuestos orgánicos presentes en el medio.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la elevada remoción de DQO (Tabla 1), superior al 90 %, observada en el tratamiento no esterilizado inoculado con *G. sulfurreducens*. La DQO representa la cantidad total de materia orgánica susceptible de oxidación química y constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar la eficiencia de procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales. La disminución observada sugiere una intensa actividad metabólica orientada a la transformación de compuestos orgánicos complejos presentes en el lactosuero, principalmente carbohidratos, lípidos y proteínas. Estudios previos han demostrado que las celdas de combustible microbianas inoculadas con bacterias electrogénicas pueden alcanzar eficiencias de remoción superiores al 80 % cuando se utilizan sustratos con alta biodegradabilidad, como residuos agroindustriales y efluentes lácteos (Logan et al., 2019; Santoro et al., 2017).

Tabla 1. Eficiencia de remoción de DQO, macronutrientes y sólidos en lactosuero.

Parámetro evaluado	Tratamiento	Resultado observado	Interpretación
Lactosa	Lactosuero no esterilizado + *G. sulfurreducens*	Remoción superior al 95 %	Sugiere una alta capacidad de aprovechamiento del sustrato y adaptación microbiana.
Proteína	Lactosuero no esterilizado + *G. sulfurreducens*	Disminución considerable	Asociada al consumo de compuestos nitrogenados y proteínas solubles.
Grasa	Lactosuero no esterilizado + *G. sulfurreducens*	Alta remoción	Evidencia la degradación de compuestos lipídicos presentes en el lactosuero.
ST, SST, SDT	Lactosuero no esterilizado + *G. sulfurreducens*	Reducción significativa	Contribuye a la mejora de la calidad fisicoquímica del efluente.
DQO	Lactosuero no esterilizado + *G. sulfurreducens*	Remoción superior al 90 %	Indica una elevada degradación de materia orgánica compleja presente en el lactosuero.

La remoción de lactosa superó el 95 %, consolidándose como el principal sustrato metabólico. Dado que *G. sulfurreducens* no utiliza eficientemente la lactosa de forma directa, este comportamiento evidencia una interacción sintrófica con la microbiota nativa del lactosuero; las bacterias autóctonas fermentaron el disacárido generando intermediarios como acetato y lactato, los cuales son sustratos preferenciales oxidados por *Geobacter* (Lovley, 2017). Esta sinergia metabólica concuerda con el incremento sostenido de la biomasa y la alta viabilidad celular observada en el tratamiento no estéril, lo que demuestra una adecuada adaptación del microorganismo a la matriz del residuo (Lovley, 2012; Kumar et al., 2023).

Por otro lado, se registró una notable reducción de grasas y sólidos (ST, SST y SDT), disminuyendo tanto la fracción soluble como la suspendida de la carga contaminante. Controlar estos parámetros es ambientalmente crítico para evitar la turbidez, sedimentación y formación de películas superficiales que limitan la transferencia de oxígeno en los cuerpos de agua receptores (Prazeres et al., 2012). En contraste, la remoción de proteínas fue menor debido a la alta complejidad estructural de las macromoléculas lácteas, cuya velocidad de biodegradación es inferior en sistemas biológicos convencionales (Carvalho et al., 2013). En conjunto, la superioridad del tratamiento no estéril confirma que la cooperación metabólica entre el inóculo y la microbiota nativa optimiza la degradación de compuestos complejos en el lactosuero, validando el potencial de esta configuración para la mitigación del impacto ambiental de efluentes agroindustriales.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la arquitectura de la celda de combustible microbiana (CCM) inoculada con *G. sulfurreducens* constituye una matriz tecnológica prometedora para el tratamiento y valorización del lactosuero regional. Bajo la configuración de circuito abierto, el tratamiento no esterilizado presentó el mejor desempeño global, evidenciado por una mayor remoción de carga orgánica, reducción de sólidos totales y un crecimiento microbiano sostenido. Este comportamiento sugiere la existencia de interacciones metabólicas sinérgicas y favorables entre *G. sulfurreducens* y la microbiota nativa del efluente para la hidrólisis y degradación del sustrato. Asimismo, la elevada viabilidad celular registrada a lo largo de los 30 días del periodo experimental confirma la adecuada adaptación y robustez del microorganismo ante la matriz del lactosuero. En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de esta configuración biológica como una alternativa sostenible para mitigar el impacto ambiental de los efluentes lácteos en Lagos de Moreno, estableciendo la línea base conceptual para futuros desarrollos orientados a la valorización energética y la economía circular agroindustrial.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Prazeres, F. Carvalho y J. Rivas, “Cheese whey management: A review”, Journal of Environmental Management, Vol. 110, 2012, pp. 48–68.
2. F. Carvalho, A. R. Prazeres y J. Rivas, “Cheese whey wastewater: Characterization and treatment”, Science of the Total Environment, Vols. 445–446, 2013, pp. 385–396.
3. D. R. Lovley, “Electromicrobiology”, Annual Review of Microbiology, Vol. 66, 2012, pp. 391–409.
4. D. R. Lovley, “Happy together: microbial communities that hook up to swap electrons”, The ISME Journal, Vol. 11, 2017, pp. 327–336.
5. D. R. Lovley y K. P. Nevin, “A shift in the current: New applications and concepts for microbe-electrode electron exchange”, Current Opinion in Biotechnology, Vol. 22, 2011, pp. 441–448.
6. B. E. Logan, R. Rossi, A. Ragab y P. E. Saikaly, “Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems”, Nature Reviews Microbiology, Vol. 17, 2019, pp. 307–319.
7. C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable y I. Ieropoulos, “Microbial fuel cells: From fundamentals to applications”, Journal of Power Sources, Vol. 356, 2017, pp. 225–244.
8. H. B. Kim, I. S. Chang y G. M. Good, “Challenges in microbial fuel cell development and operation”, Applied Microbiology and Biotechnology, Vol. 92, 2011, pp. 495–504.
9. U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service, “Dairy and products annual: Mexico”, Report No. MX2024-0051, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 2024, pp. 1–18.
10. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, “Panorama de la lechería en México 2023”, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Ciudad de México, 2024, pp. 1–64.
11. M. Tugume, M. G. Ibrahim y M. Nasr, “Valorization of cheese whey wastewater to achieve sustainable development goals”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 211, 2025, Article 115273.
12. D. R. Lovley, “Microbial fuel cells: Novel microbial physiologies and engineering approaches”, Current Opinion in Biotechnology, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 327–332.
13. B. E. Logan, “Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells”, Nature Reviews Microbiology, Vol. 7, 2009, pp. 375–381.
14. H. Liu, R. Ramnarayanan y B. E. Logan, “Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell”, Environmental Science & Technology, Vol. 38, No. 7, 2004, pp. 2281–2285.
15. K. Rabaey y W. Verstraete, “Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation”, Trends in Biotechnology, Vol. 23, No. 6, 2005, pp. 291–298.
16. B. E. Logan, J. M. Regan, J. Kim y S. Cheng, “Microbial fuel cells: Challenges and applications”, Environmental Science & Technology, Vol. 40, No. 17, 2006, pp. 5181–5192.

POTENCIAL DE BACTERIAS NATIVAS DE JALES MINEROS PARA LA SOLUBILIZACIÓN DE FOSFATO

Darina Itzel Medina Torres, Karol Karla García Aguirre, Verónica Segovia Tagle

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaría de Ingeniería campus Zacatecas
dmedinat1800@alumno.ipn.mx

RESUMEN

El fósforo es uno de los macronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, sin embargo, su disponibilidad en el suelo raramente supera los 10 µM[1] debido a que gran parte se encuentra en formas orgánicas (30–65%) e inorgánicas insolubles (5–70%) no asimilables por las plantas[2]. El fósforo orgánico requiere mineralización microbiana, mientras que el inorgánico suele encontrarse fijado a hierro, aluminio o calcio. El uso excesivo de fertilizantes fosfatados ha generado impactos ambientales como eutrofización y alteraciones en la microbiota del suelo[2,3]. En este contexto, las bacterias solubilizadoras de fosfato (BSF) representan una alternativa al participar en el ciclo del fósforo mediante la producción de ácidos orgánicos para el fosforo orgánico no disponible para las plantas y actividad enzimática para el fosforo inorgánico[4]. El presente estudio tuvo como objetivo identificar cepas bacterianas aisladas de jales mineros con capacidad de solubilizar fosfatos. Se aislaron cinco cepas a partir de una muestra de residuos mineros, las cuales fueron caracterizadas macroscópica y microscópicamente. La evaluación cualitativa de la solubilización se realizó mediante el método descrito por Mehta y Nautiyal[5], basado en la disminución del pH del medio específico asociada a la producción de ácidos orgánicos. Las cepas fueron cultivadas por triplicado durante 72 h a 35 °C y 120 rpm; posteriormente, la biomasa fue separada por centrifugación a 4000 rpm durante 15 minutos y se determinó el pH del sobrenadante. Los resultados mostraron que las cepas identificadas con la nomenclatura 1.2 (bacilos Gram negativos) y 3 (cocos Gram positivos) presentaron una disminución promedio del pH hasta 4.51 y 5.84, respectivamente, en comparación con el control, lo que indica actividad solubilizadora. Estos resultados permiten concluir que las cepas evaluadas presentan potencial para la solubilización de fosfatos, lo que sugiere su posible aplicación en estrategias de biofertilización o bioamuentación orientadas a mejorar la disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas.

INTRODUCCIÓN

El fósforo es un elemento esencial para el crecimiento vegetal, ya que participa en procesos metabólicos importantes como la fotosíntesis, la respiración, la biosíntesis de ácidos nucleicos y la formación de membranas celulares[6]. A pesar de su importancia, en los suelos su disponibilidad suele ser limitada, debido a que se encuentra principalmente en formas poco solubles o fuertemente asociadas a minerales como calcio, hierro, aluminio y magnesio[5].

Esta baja disponibilidad representa un problema para la nutrición vegetal, ya que el fósforo inorgánico soluble rara vez supera los 10 µM en la solución del suelo[1,8]. Por esta razón, en la agricultura se utilizan fertilizantes fosfatados para cubrir los requerimientos nutricionales de los cultivos; sin embargo, su uso excesivo puede generar impactos ambientales, como la eutrofización de cuerpos de agua y la alteración de la calidad del suelo[7]. Además, gran parte del fósforo aplicado puede inmovilizarse nuevamente[8].

Ante esta problemática, las bacterias solubilizadoras de fosfato representan una alternativa biotecnológica, ya que pueden participar en la movilización del fósforo mediante la producción de ácidos orgánicos, los cuales favorecen la solubilización de fosfatos inorgánicos, así como mediante actividad enzimática relacionada con la producción de ácidos orgánicos y la mineralización de fósforo orgánico[9,10].

El aislamiento de estas bacterias a partir de residuos mineros es interesante debido a que estos ambientes presentan condiciones de estrés químico[11]. Por lo tanto, las cepas bacterianas adaptadas a estos sitios podrían presentar características útiles como la tolerancia y la solubilización de nutrientes para la recuperación de suelos degradados. En este sentido, el presente trabajo tuvo como finalidad evaluar cepas bacterianas aisladas de jales mineros con capacidad de solubilizar fosfatos, lo que sugiere su posible aplicación en estrategias de biofertilización o bioamuentación orientadas a mejorar la disponibilidad de fósforo en suelos agrícolas.

TEORÍA

El fósforo es un elemento esencial para la vida, ya que forma parte de biomoléculas fundamentales y participa en procesos celulares clave como la fotosíntesis, la respiración, la biosíntesis de ácidos nucleicos y la formación de membranas celulares[7].

En los sistemas naturales, el fósforo no se encuentra como elemento libre debido a su alta reactividad química y que se encuentra asociado a otros compuestos del suelo, su movilización inicia principalmente a partir de apatitas o depósitos de fosfato natural, mediante procesos de meteorización, lixiviación y erosión de las rocas que lo contienen[6]. Una vez liberado, el fosfato puede ser absorbido por plantas y microorganismos, incorporarse a la materia orgánica del suelo, acumularse en sedimentos o volver a formar minerales poco solubles, además de estos mecanismos de movilización, el fósforo también es extraído industrialmente de rocas fosfatadas para la formulación de fertilizantes y depositado nuevamente en campos agrícolas donde el resto de fosforo que no aprovechan los cultivos pasa de nuevo al suelo de forma insoluble[6]. En el suelo, el fósforo inorgánico suele encontrarse fuertemente fijado en forma de fosfatos asociados a calcio, hierro, magnesio y aluminio, especialmente en arcillas del grupo de las caolinitas y en óxidos de hierro y aluminio. Incluso el fósforo que es aplicado como fertilizante, en forma de superfosfato, puede inmovilizarse rápidamente al interactuar con la materia orgánica y las arcillas, formando compuestos inorgánicos de baja disponibilidad para las plantas[6].

En la naturaleza el fósforo se presenta casi exclusivamente en estado de oxidación +V, principalmente como ácido ortofosfórico, una molécula triprótica cuya disociación genera los iones dihidrogenofosfato, hidrogenofosfato y ortofosfato. Las formas $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} constituyen las principales especies móviles de fósforo en la solución del suelo, y su proporción depende del pH. Por ejemplo, cuando el pH del suelo es menor a 7.0, $H_2PO_4^-$ tiende a predominar. Estas formas corresponden al fósforo biodisponible, es decir, la fracción que puede ser aprovechada por raíces y microorganismos. Sin embargo, debido a su alta reactividad, el fósforo soluble suele representar menos del 1% del fósforo total del suelo, y la concentración de fósforo inorgánico soluble rara vez supera los 10 µM en la solución del suelo[1,9]. Esta baja solubilidad y movilidad del fósforo en el suelo limita su disponibilidad para las plantas y puede afectar procesos metabólicos asociados con el crecimiento vegetal. Por ello, la escasa disponibilidad de fosfato se considera uno de los principales factores que restringen el rendimiento de los cultivos en diversos suelos agrícolas y naturales[9].

En la agricultura, es común el uso de insecticidas y fertilizantes orgánicos o químicos para maximizar la productividad. En particular, los fertilizantes fosfatados se aplican con el objetivo de aportar iones fosfato disponibles para las plantas y cubrir rápidamente esos requerimientos nutricionales[7]. No obstante, el uso excesivo de fertilizantes fosfatados puede incrementar los costos de producción y generar impactos negativos en la calidad del suelo y asociado a su movilización por procesos de escorrentía uno de los principales problemas asociados es la eutrofización de cuerpos de agua superficiales, ocasionada por la pérdida y acumulación de nutrientes en ecosistemas acuáticos[8]. Además, una proporción considerable del fósforo aplicado puede ser rápidamente retenida en el suelo mediante procesos de fijación o precipitación, formando compuestos insolubles que no están directamente disponibles para los cultivos. Esto reduce la eficiencia de los fertilizantes y aumenta la necesidad de buscar alternativas más sostenibles para mejorar la disponibilidad de fósforo[9].

Los microorganismos solubilizadores de fosfato representan una alternativa biotecnológica de interés a este problema, ya que pueden incrementar la cantidad de fósforo soluble en el ambiente mediante

distintos mecanismos. Entre ellos se encuentra la disolución de fosfatos inorgánicos insolubles mediada por la producción de ácidos orgánicos, así como la mineralización enzimática de fosfatos de origen orgánico. La diversidad funcional de estas bacterias está estrechamente relacionada con factores genéticos; por ejemplo, la solubilización de fosfatos inorgánicos se asocia con genes como gcd y pqq, involucrados en la producción de ácidos orgánicos, mientras que la mineralización de fosfatos orgánicos se relaciona con genes como phoA y phoC[10].

Los microorganismos solubilizadores de fósforo participan en procesos clave del ciclo del fósforo en el suelo, como la disolución-precipitación, adsorción-desorción y mineralización-inmovilización[11]. Estos procesos influyen directamente en la transformación del fósforo entre formas disponibles y no disponibles, por lo que las bacterias solubilizadoras de fosfato pueden contribuir a mejorar la nutrición vegetal y reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

Por otra parte, en suelos contaminados, las altas concentraciones de metales pesados representan una de las principales limitantes para la rehabilitación ambiental. Por ello, el estudio de microorganismos resistentes a metales resulta relevante, especialmente cuando estos también poseen funciones asociadas a la promoción del crecimiento vegetal[11]. Las cepas con tolerancia a metales pesados pueden contribuir a disminuir la toxicidad y acumulación de estos elementos en las plantas mediante distintos mecanismos de interacción microorganismo-metal[12].
De esta manera, las bacterias solubilizadoras de fosfato aisladas de ambientes contaminados, como residuos mineros, pueden tener un doble interés ambiental y biotecnológico: por un lado, participar en la movilización de fósforo no disponible y, por otro, presentar posibles mecanismos de tolerancia o interacción con contaminantes. Esto las convierte en candidatas potenciales para estrategias de bioaumentación, restauración de suelos degradados o apoyo a tecnologías de fitorremediación.

PARTE EXPERIMENTAL

Se realizó el aislamiento de dos cepas bacterianas (M1.2 y M3) a partir de una muestra de residuos mineros, a las cuales se les efectuó una caracterización macroscópica que incluyó la evaluación de la forma, el margen, la elevación y la pigmentación de las colonias. Posteriormente, se llevó a cabo la caracterización microscópica mediante tinción de Gram y la observación de la morfología celular.

El ensayo de solubilización de fosfatos se realizó mediante el método descrito por Mehta y Nautiyal[5]. Para las pruebas de cada aislado, se partió de un cultivo bacteriano fresco; se tomó una asada y se ajustó su turbidez al tubo número 3 del nefelómetro de McFarland, utilizando una suspensión en solución salina estéril al 0.85% (m/v). Posteriormente, se transfirió 1 mL de esta suspensión a un tubo cónico de 50 mL con 10 mL de caldo soya triptacaseína (TSB), el cual se incubó durante 12 horas a 30 °C y 120 rpm.

Después de la incubación, se transfirió una alícuota del 1% (v/v) del tubo cónico a matraces de 125 mL con 50 mL del medio de cultivo con fosfato del Instituto Nacional de Investigación Botánica (NBRIP)[5]. Este medio se compone de sacarosa (10 g), $Ca_3(PO_4)_2$ (5 g), $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (5 g), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.25 g), KCl (0.2 g), $(NH_4)_2SO_4$ (0.1 g) y azul de bromofenol (0.025 g), disueltos en 1 L de agua destilada.

Los cultivos líquidos se incubaron a 35 °C y 120 rpm durante 72 horas. Transcurrido este periodo, se tomaron alícuotas de cada matraz de 15 mL en tubos cónicos y se centrifugaron a 4000 rpm durante 15 minutos, posterior a ello se recuperó el sobrenadante, al cual se le midió el pH con un potenciómetro y la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis a 600 nm. Los controles consistieron en el medio de cultivo sin inocular, y el ensayo se realizó por triplicado para cada aislamiento.

RESULTADOS

En la **Figura 1** se muestra la caracterización morfológica de los aislamientos bacterianos que presentaron resultados significativos dentro del conjunto de cepas aisladas del relave minero para la

prueba de solubilización de fosfatos. En la cepa M1.2 se observó una morfología celular de bacilos Gram negativos. A nivel macroscópico, las colonias exhibieron una morfología puntiforme, con elevación convexa, margen entero y coloración beige homogénea. Por su parte, la cepa M3 presentó una morfología celular de cocos Gram positivos, así como colonias circulares de elevación convexa, margen entero y coloración amarillenta.

En la prueba de solubilización de fosfatos, las cepas evaluadas presentaron una disminución promedio del pH hasta 4.51 ± 0.48 para M1.2 y 5.84 para M3, en comparación con el control, cuyo pH fue de 6.89. Esta disminución indica una acidificación del medio por parte de los microorganismos, lo que sugiere actividad solubilizadora de fosfatos. Asimismo, los resultados de absorbancia mostraron una reducción con respecto al control, el cual presentó un valor de 1.533 ± 0.35. En contraste, las cepas M1.2 y M3 registraron valores de 1.09 ± 0.13 y 1.33 ± 0.02, respectivamente. Esta disminución de la absorbancia se relaciona con la pérdida de coloración del medio observada en la **Figura 2**, lo cual evidencia una modificación del indicador asociada con la acidificación del cultivo.

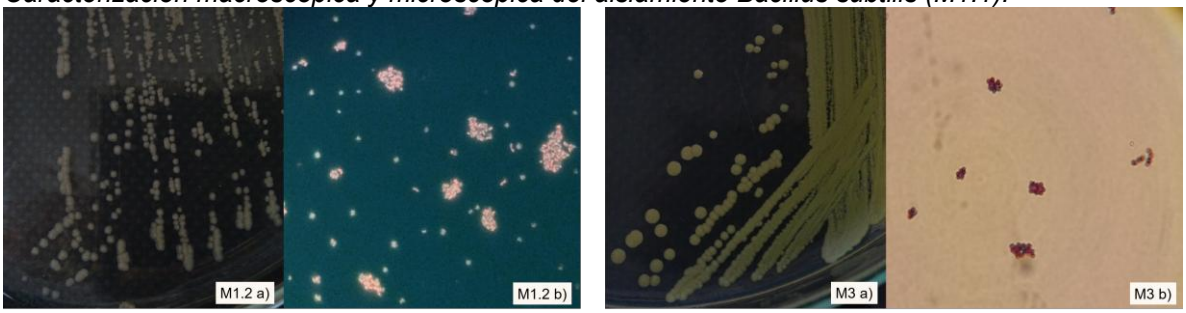
La capacidad de acidificación observada, en especial en la cepa M1.2, adquiere relevancia debido a que los aislados provienen de residuos mineros, ambientes caracterizados por baja disponibilidad de nutrientes, presencia de metales pesados y metaloides, así como condiciones de estrés químico constante[11]. En este tipo de ambientes, la capacidad de modificar químicamente el medio puede ser una posible estrategia de adaptación metabólica, ya que permite a los microorganismos movilizar nutrientes limitantes, como el fósforo, a partir de formas poco disponibles y en condiciones de estrés. La solubilización de fosfatos se relaciona principalmente con la secreción de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, los cuales cumplen funciones clave en la movilización del fósforo. Por una parte, los protones liberados por las bacterias pueden desplazar el ortofosfato fuertemente retenido en superficies cristalinas de minerales de aluminio o hierro, comunes en el suelo[13]. Por otra parte, las cargas negativas de los ácidos orgánicos disociados pueden quelar cationes metálicos libres, formando complejos organometálicos solubles y estables[13]. Estos mecanismos favorecen la liberación de fosfato hacia formas más disponibles en el medio y una interacción con los metales que reduciría su disipación al ambiente al estar en formas más estables.

El uso de medios específicos para la detección de bacterias solubilizadoras de fosfato tiene antecedentes importantes, desde el medio de Pikovskaya propuesto en 1948[6] hasta métodos colorimétricos posteriores, como el descrito por Mehta y Nautiyal[5]. En este estudio, la reducción del pH y de la absorbancia permitió diferenciar la respuesta entre los aislamientos evaluados, siendo la cepa M1.2 la que presentó mayor capacidad acidificante y, por tanto, mayor potencial de solubilización de fosfatos.

Los resultados indican que las cepas aisladas del relave minero si presentan potencial biotecnológico, especialmente la cepa M1.2, debido a su capacidad para acidificar el medio y con ello favorecer la movilización de fósforo. Esta característica podría ser relevante en estrategias de bioaumentación, biofertilización, suplementación de fitorremediación o recuperación de suelos degradados, donde la disponibilidad de fósforo y la presencia de metales pueden limitar la cubierta vegetal. No obstante, debido a que el método empleado es indirecto, la actividad solubilizadora debería confirmarse posteriormente mediante la cuantificación de fósforo soluble en el sobrenadante.

Figura 15

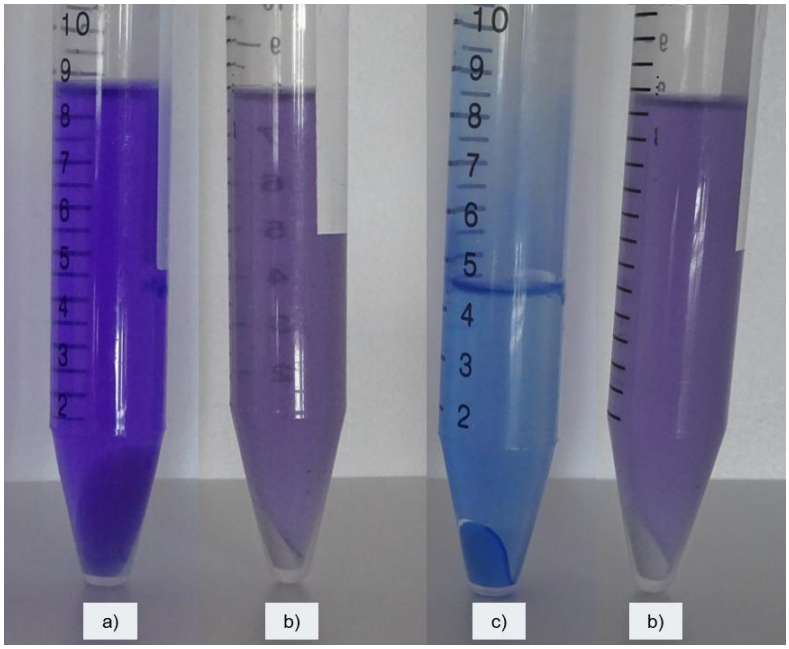
Caracterización macroscópica y microscópica del aislamiento Bacillus subtilis (M1.1).



Nota: M1.2 a) Morfología colonial, medio TSA, M1.2 b) Observación microscópica tinción con naranja de acridina (aumento total 1000x), M3 a) Morfología colonial, medio TSA, M3 b) Observación microscópica tinción Gram (aumento total 1000x).

Figura 16

Prueba de solubilización de fosfatos.



Nota: a) Cepa M3, b) Control, c) Cepa M1.2.

CONCLUSIONES

Las cepas aisladas de la muestra de relaves mineros no solo demuestran tener la capacidad de sobrevivir condiciones de estrés, sino que los resultados muestran una facultad para acidificar el medio y modificar la coloración del indicador, lo que indica actividad solubilizadora de fosfatos y la capacidad movilizar fósforo a una forma asimilable, especialmente la cepa M1.2 destacó por tener una mayor respuesta lo que a su vez podría mitigar la toxicidad de cationes metálicos mediante quelación y las convierte en candidatas para tecnologías de remediación hacia la restauración de suelos degradados por la actividad minera.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. D. Suleimanova, A. Beinhauer, L. R. Valeeva, I. B. Chastukhina, N. P. Balaban, E. V. Shakirov, R. Greiner, and M. R. Sharipova, "Novel glucose-1-phosphatase with high phytase activity and unusual metal ion activation from soil bacterium Pantoea sp. strain 3.5.1," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 81, no. 19, pp. 6790–6799, 2015, doi: 10.1128/AEM.01384-15.
2. H. L. Santos, G. F. da Silva, M. R. A. Carnietto, L. C. Oliveira, C. H. de C. Nogueira, and M. de A. Silva, "Bacillus velezensis associated with organomineral fertilizer and reduced phosphate doses improves soil microbial—chemical properties and biomass of sugarcane," *Agronomy*, vol. 12, no. 11, Art. no. 2701, 2022, doi: 10.3390/agronomy12112701.
3. A. K. Singh, J. B. Singh, R. Singh, S. R. Kantwa, P. K. Jha, S. Ahamad, et al., "Understanding soil carbon and phosphorus dynamics under grass-legume intercropping in a semi-arid region," *Agronomy*, vol. 13, no. 7, Art. no. 1692, 2023, doi: 10.3390/agronomy13071692.
4. L. Pan and B. Cai, "Phosphate-solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects," *Microorganisms*, vol. 11, no. 12, Art. no. 2904, 2023, doi: 10.3390/microorganisms11122904.
5. S. Mehta and C. S. Nautiyal, "An efficient method for qualitative screening of phosphate-solubilizing bacteria," *Current Microbiology*, vol. 43, no. 1, pp. 51–56, 2001, doi: 10.1007/s002840010259.
6. L. E. Cerón-Rincón and F. A. Aristizábal-Gutiérrez, "Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos," *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 14, no. 1, pp. 285–295, 2012.
7. H.-J. Hawkins, M. D. Cramer, J. Mesjasz-Przybylowicz, W. Przybylowicz, E. Louw, and C. O'Brien, "Prevention and amelioration of phosphorus toxicity in Proteaceae grown on previously fertilised land," *Acta Horticulturae*, no. 869, pp. 37–46, 2010, doi: 10.17660/ActaHortic.2010.869.3.
8. I. C. Dodd, N. Y. Zinovkina, V. I. Safronova, and A. A. Belimov, "Rhizobacterial mediation of plant hormone status," *Annals of Applied Biology*, vol. 157, no. 3, pp. 361–379, 2010, doi: 10.1111/j.1744-7348.2010.00439.x.
9. A. Ducousso-Détrez, J. Fontaine, A. Lounès-Hadj Sahraoui, and M. Hijri, "Diversity of phosphate chemical forms in soils and their contributions on soil microbial community structure changes," *Microorganisms*, vol. 10, no. 3, Art. no. 609, 2022, doi: 10.3390/microorganisms10030609.
10. Z. Dai, G. Liu, H. Chen, C. Chen, J. Wang, S. Ai, et al., "Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems," *The ISME Journal*, vol. 14, pp. 757–770, 2020, doi: 10.1038/s41396-019-0567-9.
11. S. B. Sharma, R. Z. Sayyed, M. H. Trivedi, and T. A. Gobi, "Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils," *SpringerPlus*, vol. 2, Art. no. 587, 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-587.
12. X. Hu and H. Chen, "Phosphate solubilizing microorganism: A green measure to effectively control and regulate heavy metal pollution in agricultural soils," *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, Art. no. 1193670, 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1193670.
13. M. Paredes-Mendoza and D. Espinosa-Victoria, "Ácidos orgánicos producidos por rizobacterias que solubilizan fosfato: Una revisión crítica," *Terra Latinoamericana*, vol. 28, no. 1, pp. 61–70, 2010.

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL FUNGISTÁTICO DE DESTILADOS ACUOSOS VEGETALES COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE CONTRA *Botrytis Sp*

Gabriel González Hernández[1], Maribel Flores González[1], Alma Cristina Arellano García[1], Josefina Águila López[2], José Francisco Sánchez Ramírez[1], Norma Maribel Ariza Rendón[1], Suri Jaziel García Vargas[1], Bryan de Jesús De la Cruz Maldonado[1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA). [2] Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA).
mflorego@ipn.mx

RESUMEN

La industria agrícola enfrenta un desafío creciente por la incidencia y diseminación de hongos fitopatógenos como *Botrytis* sp., los cuales provocan pérdidas importantes en especies vegetales de valor económico y deterioran su calidad poscosecha. El control convencional con fungicidas sintéticos ha favorecido la aparición de cepas resistentes y ha incrementado la preocupación por sus impactos ambientales y toxicológicos. En este contexto, se evaluó in vitro el potencial antifúngico de destilados acuosos obtenidos por hidrodestilación a partir de *Cupressus lusitanica*, *Schinus molle*, *Senecio cinerarioides*, *Lavandula angustifolia*, *Passiflora edulis* y *Ruta graveolens*. Los bioensayos de inhibición se realizaron mediante la técnica de Kirby-Bauer en medio agar papa dextrosa (PDA), empleando concentraciones de 25, 50, 75 y 100% (v/v). La inhibición de la germinación de conidios se evaluó en caldo papa-dextrosa con una concentración de 1×10^4 esporas/mL de *Botrytis* sp., incubado a 26 °C en oscuridad total. Se cuantificaron esporas germinadas y no germinadas a las 24, 48 y 72 h mediante cámara de Neubauer. El destilado acuoso de *Cupressus lusitanica* presentó la mayor actividad inhibitoria, con un efecto del 81% sobre la densidad de conidios de *Botrytis* sp. En contraste, *Senecio cinerarioides*, *Lavandula angustifolia* y *Passiflora edulis* mostraron eficacias limitadas, entre 10 y 22%. Estos resultados indican que los destilados acuosos vegetales, particularmente el de *Cupressus lusitanica*, constituyen candidatos promisorios para el desarrollo de biofungicidas y estrategias de manejo fitosanitario sostenible.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades poscosecha causadas por hongos fitopatógenos representan una de las principales limitantes para la productividad agrícola, la calidad comercial de los frutos y la seguridad alimentaria. Entre estos patógenos, *Botrytis* sp. destaca por su elevada capacidad de infección, rápida diseminación y amplio rango de hospederos, lo que lo convierte en un agente de gran relevancia económica en la etapa de almacenamiento y comercialización de productos hortofrutícolas [1,2].

El control convencional basado en fungicidas sintéticos ha mostrado limitaciones crecientes debido a la aparición de cepas resistentes y a la preocupación por la acumulación de residuos químicos y sus efectos ambientales y toxicológicos [3,4]. Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas biotecnológicas sostenibles que permitan mantener la sanidad vegetal sin comprometer la inocuidad ni el equilibrio ambiental.

En este contexto, los destilados acuosos obtenidos por hidrodestilación se han posicionado como una opción atractiva, ya que contienen compuestos volátiles hidrosolubles con potencial actividad antimicrobiana y representan subproductos de valor agregado derivados de plantas aromáticas [5,6]. Su evaluación frente a hongos fitopatógenos permite explorar herramientas de manejo más seguras, ecológicas y compatibles con la agricultura sostenible.

TEORÍA

Botrytis sp. como patógeno de importancia poscosecha

Botrytis sp. es uno de los hongos fitopatógenos más estudiados por su capacidad de afectar numerosos cultivos y causar pudriciones durante el desarrollo y almacenamiento de frutos y hortalizas. Su éxito como patógeno se relaciona con la producción de conidios, la rápida colonización de tejidos y la capacidad de establecer infecciones bajo condiciones ambientales favorables [1,2]. Este comportamiento lo convierte en un modelo relevante para el desarrollo de estrategias de control alternativas.

Destilados acuosos vegetales y actividad antifúngica

Los destilados acuosos o hidrolatos son fracciones líquidas obtenidas durante la hidrodestilación de material vegetal. Aunque suelen contener menor concentración de metabolitos que los aceites esenciales, conservan compuestos volátiles con actividad biológica que pueden alterar la permeabilidad de membrana, la respiración y el metabolismo de microorganismos [5,6]. Por ello, han cobrado interés como insumos potenciales para el control biológico y poscosecha.

Potencial de especies vegetales aromáticas

Especies como *Cupressus lusitanica*, *Schinus molle*, *Ruta graveolens* y *Lavandula angustifolia* han sido reportadas por su contenido de compuestos volátiles con actividad antimicrobiana. La composición química de cada especie y el proceso de extracción determinan la eficacia observada, lo que justifica la evaluación comparativa de distintos destilados acuosos frente a *Botrytis* sp. [5,6].

PARTE EXPERIMENTAL

Material vegetal y obtención de destilados acuosos

Se evaluaron destilados acuosos obtenidos por hidrodestilación a partir de especies vegetales aromáticas seleccionadas por su potencial biológico: *Cupressus lusitanica*, *Schinus molle*, *Senecio cinerarioides*, *Lavandula angustifolia*, *Passiflora edulis* y *Ruta graveolens*. El material vegetal fue recolectado, secado y posteriormente procesado bajo condiciones controladas para recuperar la fracción acuosa con compuestos volátiles de interés antifúngico. Los destilados obtenidos fueron conservados en condiciones de refrigeración (4 °C) hasta su uso experimental.

Material biológico e inoculación

El fitopatógeno evaluado fue *Botrytis* sp. Cepa otorgada por la Dra. Maribel Flores González (CIBA-IPN) de su cepario personal. Para su uso en los ensayos, se preparó una suspensión de conidios a una concentración de 1×10^4 esporas/mL. La suspensión se homogenizó cuidadosamente antes de cada ensayo para asegurar una distribución uniforme del inóculo.

Bioensayo de inhibición

La actividad antifúngica de los destilados acuosos se determinó mediante la técnica de difusión en agar (Kirby-Bauer) en medio agar papa dextrosa (PDA) estéril, ajustado a pH 6.0. Se evaluaron concentraciones de 25, 50, 75 y 100% (v/v) de cada destilado acuoso, con el fin de determinar su efecto sobre el crecimiento fúngico. Los tratamientos se compararon frente a un control sin destilado. La interpretación del efecto se realizó con base en la inhibición observada respecto al grupo control.

Evaluación de la germinación de conidios

La inhibición de la germinación se evaluó en caldo papa-dextrosa estéril (pH 6.0), inoculado con *Botrytis* sp. a una concentración inicial de 1×10^4 esporas/mL. Los cultivos fueron incubados a 26 °C

en oscuridad total durante 72 h. Se tomaron alícuotas de 10 µL a las 24, 48 y 72 h de incubación. Posteriormente, se cuantificaron los conidios germinados y no germinados en cámara de Neubauer, registrando la densidad celular y el porcentaje de germinación en cada tratamiento.

Análisis de datos

Los resultados se expresaron como densidad de conidios (cel/mL), porcentaje de germinación y porcentaje de inhibición respecto al control. El porcentaje de inhibición se calculó tomando como referencia la densidad de conidios observada en el control y la obtenida en cada tratamiento. Los datos se compararon entre tratamientos y tiempos de incubación para identificar diferencias en la actividad fungistática. En las representaciones gráficas se consideró un análisis de comparación múltiple para la asignación de letras de significancia.

RESULTADOS

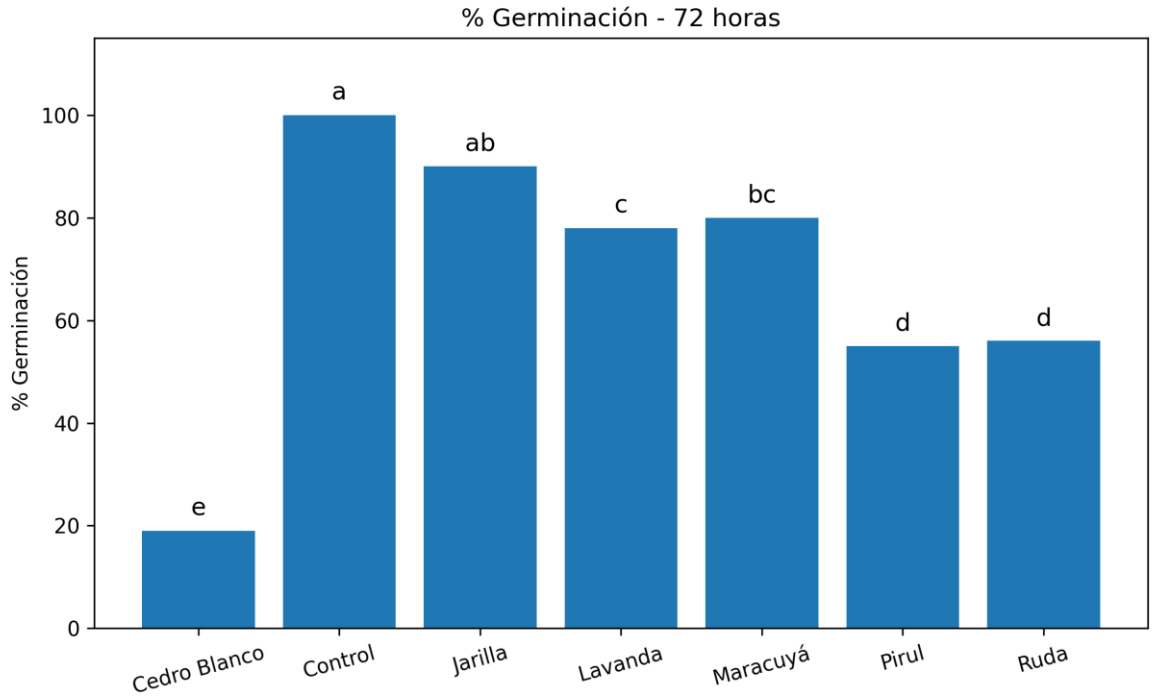


Figura 2. Efecto de diferentes hidrolatos vegetales sobre la germinación de conidios de *Botrytis* sp. a las 72 h de incubación. Los valores corresponden a la media de tres repeticiones independientes (n = 3) expresadas como porcentaje relativo respecto al control. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

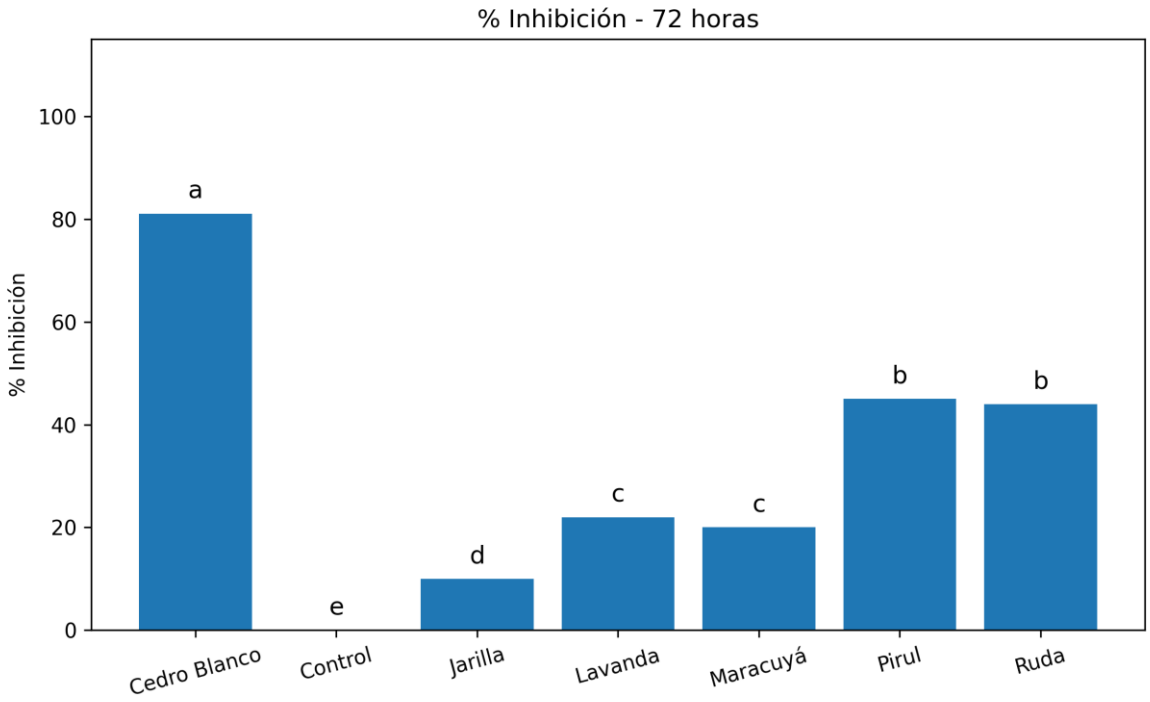


Figura 2. Porcentaje de germinación de conidios de *Botrytis* sp. después de 72 h de incubación en presencia de diferentes hidrolatos vegetales. Los datos representan la media de tres repeticiones independientes (n = 3) y se expresan como porcentaje relativo respecto al control (100%). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Los destilados acuosos evaluados mostraron una respuesta diferencial frente a *Botrytis* sp. El tratamiento con *Cupressus lusitanica* presentó la mayor actividad fungistática, con una inhibición del 81% sobre la densidad de conidios a las 72 h.

En contraste, *Senecio cinerarioides*, *Lavandula angustifolia* y *Passiflora edulis* mostraron una eficacia limitada, con inhibiciones entre 10 y 22%. *Schinus molle* y *Ruta graveolens* presentaron una actividad intermedia, por debajo del efecto observado para *Cupressus lusitanica*.

La respuesta inhibitoria dependió del origen botánico del destilado y del tiempo de incubación, observándose una reducción más marcada del desarrollo fúngico durante las primeras 72 h de exposición.

DISCUSIÓN

La elevada actividad antifúngica observada en *Cupressus lusitanica* sugiere la presencia de compuestos volátiles con efecto fungistático, asociados con alteraciones en la membrana y el metabolismo fúngico. La respuesta diferencial entre tratamientos puede relacionarse con variaciones en la composición química de los destilados acuosos y en la susceptibilidad del patógeno [5,6].

Estos resultados concuerdan con la literatura que reporta a los hidrolatos como fracciones con actividad antimicrobiana dependiente de su origen botánico y de la concentración de metabolitos activos [5,6]. Aunque su potencia suele ser menor que la de los aceites esenciales, su menor agresividad, su origen como subproducto y su compatibilidad con estrategias de bajo impacto los hacen especialmente atractivos para el manejo poscosecha.

El comportamiento observado en *Botrytis* sp. es consistente con la necesidad de alternativas sostenibles frente al uso intensivo de fungicidas sintéticos, los cuales han contribuido al desarrollo de resistencia y a la acumulación de residuos en los alimentos [3,4]. En este sentido, los destilados acuosos de especies aromáticas, y en particular *Cupressus lusitanica*, representan una opción prometedora para el desarrollo de biofungicidas con potencial aplicación en fitosanidad sostenible.

CONCLUSIONES

Los destilados acuosos vegetales evaluados mostraron actividad antifúngica frente a *Botrytis* sp., destacando el de *Cupressus lusitanica* por su mayor capacidad inhibitoria. Los tratamientos de *Schinus molle* y *Ruta graveolens* presentaron un efecto intermedio, mientras que *Senecio cinerarioides*, *Lavandula angustifolia* y *Passiflora edulis* mostraron eficacias limitadas.

En conjunto, los resultados respaldan el potencial de los destilados acuosos vegetales como alternativa biotecnológica sostenible para el control poscosecha de hongos fitopatógenos. Su aplicación podría contribuir al desarrollo de estrategias fitosanitarias más seguras, ecológicas y compatibles con una agricultura sustentable.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dean R, van Kan JAL, Pretorius ZA, Hammond-Kosack KE, Di Pietro A, Spanu PD, et al. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol Plant Pathol.* 2012;13(4):414–430.
2. Williamson B, Tudzynski B, Tudzynski P, van Kan JAL. *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Mol Plant Pathol.* 2007;8(5):561–580.
3. Hahn M. The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi: *Botrytis* as a case study. *J Chem Biol.* 2014;7(4):133–141.
4. Popp J, Pető K, Nagy J. Pesticide productivity and food security. *Agron Sustain Dev.* 2013;33:243–255.
5. D'Amato S, Serio A, López CC, Paparella A. Hydrosols: Biological activity and potential as antimicrobials for food applications. *Food Control.* 2018;86:126–137.
6. Di Vito M, Smolka A, Proto MR, et al. Is the antimicrobial activity of hydrolates lower than that of essential oils? *Antibiotics.* 2021;10(1):88.

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN BIODIGESTOR ALIMENTADO DE DESECHOS ORGÁNICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Ximena Ramirez Tapia[1], José Angel Flores Mejia[2], Ivan Arroyo Ordoñez[2], Sofia Valentina Calvillo Beltrán[2], Jatziri López García[2], Diana Isabel Osorio Sánchez[2], Daniela Mirely Garcia López[2], Adrian Eliseo Catálan Martinez[2].

Universidad Politécnica de Cuautitlán Izcalli Lago de Guadalupe
1323232024@upci.edu.mx

RESUMEN

El biogás se ha consolidado como una alternativa energética renovable de creciente interés, particularmente en comunidades rurales donde la disponibilidad de residuos orgánicos representa tanto un problema ambiental como una oportunidad de aprovechamiento. En zonas del Estado de México, como el municipio de Cuautitlán Izcalli, la acumulación de desechos orgánicos genera riesgos sanitarios debido a la liberación de metano, dióxido de carbono, amoníaco y sulfuro de hidrógeno durante su descomposición anaerobia, gases asociados al efecto invernadero y a problemas de toxicidad y corrosión. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo el diseño y evaluación de un biodigestor orientado a la recuperación energética a partir de residuos porcinos, incorporando un sistema de purificación para mejorar la calidad del biogás obtenido.

El desarrollo experimental contempló la construcción de un biodigestor anaerobio de configuración cerrada, equipado con válvulas y llaves de control para regular el flujo de gas y garantizar condiciones seguras de operación. Se integró un sistema de filtración en dos etapas: la primera consistió en una trampa de agua destinada al control de humedad, retención de impurezas y captura parcial de compuestos solubles como el amoníaco; la segunda etapa empleó hidróxido de calcio, obtenido mediante cáscaras de huevo, como agente neutralizante para la reducción de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, este último caracterizado por su alta toxicidad y potencial corrosivo. Asimismo, se incorporó un mecanismo de almacenamiento flexible que permitió regular la disponibilidad del gas producido conforme a la demanda energética.

El análisis del desempeño del sistema se sustentó en principios de biotecnología e ingeniería, evaluando de manera cualitativa la estabilidad de la combustión y las características sensoriales del gas purificado.

El proyecto demuestra que la implementación de tecnologías accesibles, de bajo costo y con esquemas operativos sencillos constituye una alternativa viable para la generación de energía renovable y el manejo sustentable de residuos orgánicos.

INTRODUCCIÓN

La gestión inadecuada de los residuos orgánicos representa uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios a nivel global. La acumulación de estiércol animal, como el de ganado vacuno, sin un tratamiento adecuado genera impactos negativos significativos: la emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono), la contaminación de mantos freáticos y suelos por lixiviados, y la proliferación de enfermedades.

Un biodigestor es un sistema cerrado, generalmente de forma cilíndrica, que crea un ambiente anaeróbico donde se deposita la materia orgánica. En su interior, bacterias metanogénicas descomponen la biomasa a través de un proceso biológico natural de digestión anaerobia, produciendo como producto principal biogás.

El presente proyecto se enfoca en la implementación de un biodigestor para el aprovechamiento del estiércol vacuno, con el objetivo de utilizar la boñiga en la producción de biogás, mitigando así la contaminación ambiental y generando alternativas energéticas sostenibles.

TEORÍA

Un biodigestor es un sistema compuesto por un reactor hermético, cerrado e impermeable, diseñado para confinar sustratos orgánicos (como efluentes pecuarios, residuos domésticos y biomasa vegetal, excluyendo cítricos debido a su potencial de acidificación) en una dilución acuosa óptima. El propósito fundamental de este dispositivo es mitigar la carga contaminante de los residuos mediante digestión anaerobia, transformándolos en subproductos de alto valor: biogás y biofertilizantes ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (NPK).

Para iniciar y optimizar este proceso microbiológico, se emplea un inóculo. Este consorcio microbiano es previamente seleccionado y acondicionado para garantizar una cinética de crecimiento eficiente dentro del reactor, acelerando la degradación de la materia orgánica una matriz heterogénea de macromoléculas y agregados coloidales supramoleculares que interactúan activamente con el medio.

La degradación de la biomasa ocurre en un ambiente estrictamente anóxico mediante un metabolismo fermentativo, donde los microorganismos liberan energía en forma de ATP a partir de la glucosa. La fase crítica y final de este ciclo es la metanogénesis (la etapa culminante de la descomposición en ausencia de oxígeno), mediada por arqueas metanogénicas. Estos microorganismos anaerobios estrictos metabolizan los intermediarios de las fases previas para producir metano y dióxido de carbono, los componentes principales del biogás utilizado como vector energético renovable.

PARTE EXPERIMENTAL

Criterios de selección y justificación de materiales

La selección de los componentes para armar el prototipo a escala se basó en criterios técnicos, mecánicos y económicos, buscando asegurar el correcto funcionamiento del proceso anaerobio. Como la digestión de la materia orgánica produce una fase líquida con presencia de ácidos grasos y una mezcla gaseosa compuesta por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de ácido sulfhídrico (H_2S), los materiales elegidos debían ser resistentes a la corrosión química y evitar escapes o fugas de gas [1].

El polietileno de alta densidad (HDPE) se eligió para el reactor principal y los botes de las trampas debido a su excelente inercia química y nula transferencia de monómeros al medio reactivo, lo que resguarda la viabilidad de la microbiota presente en el interior del biodigestor, además de ofrecer una alta resistencia al impacto estructural [2]. Para las tuberías y el control del flujo se utilizó PVC Cédula 40 y válvulas de esfera del mismo material, ya que ofrecen una estructura rígida, facilitan el paso constante del gas y se pueden unir de forma segura con pegamento comercial a un bajo costo. Las uniones roscadas y los puntos con mayor esfuerzo mecánico se armaron con piezas metálicas específicas. Se usó hierro galvanizado en las reducciones tipo bushing por su resistencia al apretar las piezas, y bronce en los conectores espiga para lograr un acoplamiento seguro con las mangueras flexibles. Para el almacenamiento del biogás se prefirieron cámaras neumáticas flexibles (llantas de motocicleta), cuya elasticidad permite guardar el gas a baja presión, reduciendo el riesgo de microfugas en las conexiones del sistema.

Inventario técnico de componentes

En la Tabla 1 se detalla la cantidad, dimensiones comerciales y función de cada uno de los materiales utilizados en el desarrollo del sistema de biodigestión.

Tabla 1. Especificaciones técnicas e inventario del prototipo de biodigestor.

Componente / Material	Especificación Técnica	Cantidad	Función en el Sistema
Contenedor principal (HDPE)	Capacidad: 20 L, tapa hermética	1 pza	Reactor anaerobio por lotes (*batch*).
Contenedores secundarios (HDPE)	Capacidad 5 L, con tapa	2 pzas	Módulos para trampas químicas
Tubería de PVC rígido	Diámetro: 1/2 pulgada (12.7 mm), Cédula 40	1.5 m	Conducción y soportes rígidos de gas.
Válvulas de esfera (PVC)	Diámetro: 1/2 pulgada (12.7 mm), con maneral azul	3 pzas	Control de flujo, aislamiento y desvío del gas.
Codos de 90° (PVC)	Diámetro: 1/2 pulgada (12.7 mm), para cementar	3 pzas	Direccionamiento angular de las líneas de PVC.
Conector en T (PVC)	Diámetro: 1/2 pulgada (12.7 mm), para cementar	1 pza	Bifurcación hacia almacenamiento o salida del biogás.
Adaptadores terminales hembra y macho (PVC)	Diámetro: 1/2 pulgada (12.7 mm), cementar-roscar	6 pzas	Transición entre el interior y el exterior de los botes.
Reducciones Bushing	Hierro galvanizado, rosca de 1/2 pulgada (12.7 mm)	6 pzas	Soporte estructural y ajuste de roscas.
Conectores espiga (Pivotes)	Bronce/Latón, rosca macho 1/2 pulgada NPT	6 pzas	Acoplamiento para conectar mangueras flexibles.
Manguera para gas	Color amarillo, alta presión, flexible	1.5 m	Interconexión flexible entre botes y líneas terminales.
Manguera de nivel (Plástico)	Transparente, flexible, diámetro adaptable	0.15 m	Acoplamiento directo al pivote de la cámara neumática.
Abrazaderas de cremallera	Acero inoxidable, tipo sin fin	7 pzas	Sujeción de mangueras a espigas para evitar fugas.
Cámara neumática	Caucho elastómero (Llanta de motocicleta)	1 pza	Depósito flexible para almacenamiento de biogás.

Válvula terminal	Aleación de cobre / Boquilla para quemador	1 pza	Salida y control del flujo del producto final.
Cinta de teflón (PTFE)	Alta densidad, ancho: 1/2 pulgada	1 pza	Sellado de seguridad en todas las uniones roscadas.
Cemento para PVC	Grado industrial, base solvente	1 lata	Unión y sellado permanente de tuberías plásticas.
Empaques de hule / goma	Ajuste hermético	10 pzas	Sellado de seguridad a ambos lados de las tapas plásticas.

Ensamblaje del sistema de biodigestión

El armado del prototipo se realizó de forma secuencial para asegurar la unión mecánica de las piezas y el correcto flujo del biogás. Primero, se lavaron y desinfectaron el contenedor principal de 20 L y los dos botes secundarios de 5 L para evitar la presencia de microorganismos externos que pudieran competir con las bacterias del proceso. Después, se hicieron perforaciones circulares en el centro de las tapas plásticas de los botes secundarios mediante un taladro con broca de copa. Para garantizar el sellado hermético y evitar fugas de gas, cada tapa plástica se colocó en medio de un conector macho y un conector hembra (ensamble tipo sándwich), añadiendo empaques de hule en ambos lados de la tapa antes de realizar el apriete mecánico. Posteriormente, se acoplaron las reducciones tipo bushing de hierro galvanizado de 1/2 pulgada (12.7 mm) para dar soporte estructural y permitir la transición hacia el resto de las conexiones.

La red de conducción rígida se construyó cortando el tubo de PVC de 1/2 pulgada a la medida. Los segmentos de tubería se unieron a los tres codos de 90° y al conector en T usando pegamento comercial para PVC, garantizando un sellado firme. Durante este proceso, se instalaron tres válvulas de esfera de PVC de 1/2 pulgada con maneral azul para permitir el control del flujo y poder aislar cada etapa del proceso de forma independiente.

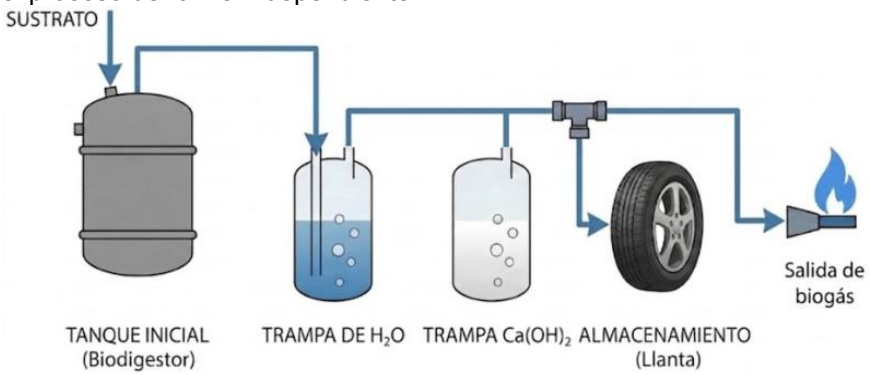


Figura 1. Diagrama de flujo del prototipo de biodigestión y purificación a escala.

Para conectar las secciones flexibles, los adaptadores de PVC se enroscaron a las reducciones de hierro y a los conectores espiga de bronce. La manguera amarilla para gas se cortó en tres segmentos para unir los botes entre sí, conectándose a presión en las espigas de bronce. El ajuste y la hermeticidad en estas uniones se aseguró colocando 7 abrazaderas metálicas de acero inoxidable, apretadas firmemente en cada punto de conexión. La cámara neumática flexible se acopló a la salida de la conexión en T usando el tramo de 0.15 m de manguera transparente de nivel.

Pruebas de hermeticidad y control de fugas
Antes de introducir el estiércol y el inóculo, se verificó que no hubiera fugas en ninguna unión se aplicó una solución jabonosa con una brocha sobre todas las uniones críticas, incluyendo las juntas pegadas de PVC, las uniones de los conectores macho-hembra con sus empaques en las tapas, las conexiones roscadas de bronce y hierro, y los bordes de los contenedores. El sistema se presurizó ligeramente de forma manual; al observar que no se formaban burbujas en ningún punto, se comprobó la correcta hermeticidad del prototipo.

Preparación de las trampas de purificación
El sistema se acondicionó con dos etapas consecutivas de purificación para mejorar la calidad del biogás antes de guardarlo de forma flexible. El bote secundario de color naranja se preparó como una trampa química para eliminar el ácido sulfhídrico, agregando una solución de hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ al 10% p/v. Esta concentración se estableció pesando 100 g de hidróxido de calcio de grado comercial por cada litro de agua destilada utilizada, lo que asegura una cantidad suficiente de iones hidroxilo para reaccionar sin saturar el medio ni obstruir los conductos por acumulación de sedimentos. Al pasar el biogás por esta solución, el ácido sulfhídrico (H_2S) reacciona químicamente con el $Ca(OH)_2$, quedando así en forma de precipitado y previniendo la corrosión de elementos metálicos y la presencia de olores fétidos. [1, 3]

El bote secundario de color verde se llenó con agua destilada pura (H2O) para funcionar como sello de agua físico y trampa secundaria. Además de actuar como una válvula de retención que impide la entrada de aire y mantiene la presión interna necesaria para inflar la cámara neumática, esta trampa permite retener por solubilidad física una porción del dióxido de carbono (CO2) presente en la mezcla gaseosa, ayudando a concentrar el metano y deteniendo el arrastre de humedad hacia la línea final.

Preparación del sustrato e inoculación.
El sustrato utilizado consistió en estiércol vacuno fresco recolectado en Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Tomando en cuenta que el estiércol vacuno fresco de la región posee un contenido típicamente alto de sólidos totales, se aplicó una dilución en relación homogénea 1:1 con agua destilada. Este ajuste metodológico permitió disminuir la viscosidad de la mezcla y establecer el porcentaje de sólidos totales en el rango óptimo reportado para la digestión anaerobia (~10%), lo cual optimiza la transferencia de masa y la movilidad metabólica bacteriana. [3]

Finalmente, la mezcla preparada se introdujo en el reactor de 20 L, llenándolo hasta el 75% de su capacidad para dejar un espacio libre donde se acumulara el gas de forma inicial. El reactor se cerró herméticamente de inmediato para desplazar el oxígeno residual y dar inicio al bioproceso por lotes (batch) en condiciones ambientales de laboratorio.

RESULTADOS

La evaluación experimental del biodigestor por lotes (*batch*) con una capacidad operativa de 20 L, alimentado con estiércol vacuno fresco recolectado en Cuautitlán Izcalli, Estado de México, permitió analizar detalladamente tanto la cinética de producción de biogás como la eficiencia del sistema de limpieza química implementado. En la Figura 2 se muestra el arreglo experimental completo instalado en el laboratorio, donde se aprecia la distribución en serie del reactor principal, el tren de purificación por etapas (compuesto por las trampas de agua y de hidróxido de calcio) y el sistema de almacenamiento final del gas. Los resultados analíticos obtenidos a partir de esta configuración confirman que es plenamente viable producir un biocombustible de alta calidad en condiciones controladas de laboratorio si se realiza un ajuste adecuado en las propiedades reológicas de la mezcla inicial.



Figura 2. Prototipo de biodigestor construido en su totalidad.

Cinética de producción de biogás y comportamiento de los microorganismos

Al diluir el estiércol fresco en una relación de volumen 1:1 con agua destilada, se logró ajustar el contenido de sólidos al rango recomendado del 10%. Esta reducción en la consistencia de la mezcla evitó que se separarán las fases sólida y líquida, lo que facilitó el movimiento de los microorganismos y les permitió absorber mejor los nutrientes [4].

Como se observa en la Gráfica 1, durante los primeros tres días la producción de gas fue muy baja debido al tiempo de adaptación que necesitan las bacterias para comenzar a descomponer la materia orgánica compleja del estiércol. A partir del cuarto día, la generación de gas aumentó rápidamente hasta alcanzar su punto máximo el día 10. Este pico representa el momento de mayor actividad de los microorganismos encargados de producir metano, quienes aprovecharon la abundancia de nutrientes acumulados [1]. Después del día 18, la producción disminuyó notablemente porque la materia orgánica disponible comenzó a agotarse. Este comportamiento permitió establecer el día 21 como el momento ideal para realizar la recarga del reactor, asegurando la continuidad del sistema sin dejar morir la población bacteriana.

Gráfica 1. Comportamiento de la producción acumulada de biogás a lo largo del tiempo, mostrando el punto máximo en el día 10 y el descenso por agotamiento hacia el día 21.

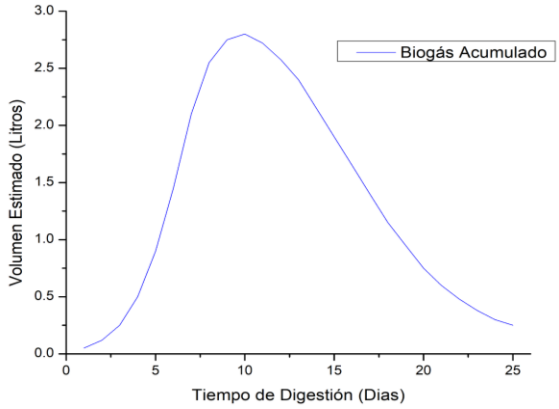


Tabla 2. Fases operativas presentes en la gráfica de producción de biogás.

Fase Operativa	Intervalo (Días)	Estado del Sustrato Orgánico	Fenómeno Microbiológico Predominante
Latencia e Hidrólisis	1 - 3	Alta concentración de materia compleja.	Adaptación de las bacterias y descomposición inicial.
Exponencial (Metanogénesis)	4 - 10	Máxima disponibilidad de nutrientes líquidos.	Pico de actividad de los microorganismos; mayor generación de gas.
Estabilización	11 - 17	Consumo moderado de la materia restante.	Producción constante por equilibrio en la población bacteriana.
Agotamiento y Cierre	18 - 21	Agotamiento de la materia biodegradable.	Disminución de la actividad; necesidad de recargar el sistema.

Eficiencia del sistema de purificación química

El biogás crudo contiene trazas de vapor de agua y gases ácidos nocivos, principalmente ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2), derivados del mismo proceso de descomposición. La presencia de estos componentes reduce el poder del gas para generar calor y causa una severa corrosión en conexiones y válvulas metálicas [1]. Para resolver esto, el gas se hizo pasar por un tren de limpieza compuesto por una trampa de agua y un filtro con una solución de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$).

La efectividad de este lavado químico se comprobó de manera cualitativa al abrir la válvula final, ya que se eliminaron por completo los malos olores fétidos característicos del azufre. Este proceso ocurre mediante una reacción de neutralización donde los gases ácidos quedan atrapados en la solución líquida. La eliminación de estas impurezas es fundamental en sistemas pequeños, ya que protege las válvulas y conexiones de PVC y latón contra el desgaste prematuro, extendiendo la vida útil del prototipo [1].

Validación energética mediante ensayos de ignición

Para verificar si el biogás realmente se había enriquecido tras pasar por los filtros, se realizaron pruebas de encendido directo a partir del décimo día, aprovechando el momento de mayor presión dentro del reactor. El gas purificado se liberó de forma controlada a través de la válvula instalada al final del sistema.

El comportamiento de la combustión mostró una llama de color azul intenso y muy estable, como se ilustra en la Figura 3. En los procesos de combustión, una flama azul es una prueba directa de que el biogás posee una alta concentración de metano (CH_4) y que el quemado se realiza de manera completa y eficiente [1]. Por otro lado, la total ausencia de chispas o destellos amarillos confirmó el éxito de la trampa de humedad, demostrando que el gas estaba libre de microgotas de agua suspendidas que pudieran apagar o desestabilizar la flama. Estos resultados consolidan al prototipo como una alternativa económica y funcional para el aprovechamiento de desechos ganaderos [5].



Figura 3. Prueba de ignición del biogás purificado tras 10 días de recolección, donde se observa una llama azul estable que confirma la eliminación exitosa de impurezas.

CONCLUSIONES

El desarrollo, diseño y evaluación operativa del prototipo de biodigestor permitieron validar con éxito la viabilidad técnica, energética y ambiental del proceso de digestión anaerobia como una solución apta para la valorización de residuos ganaderos mediante la recuperación de energía limpia. A través del monitoreo continuo y sistemático del sistema, se logró determinar la cinética de producción de biogás, identificando el rendimiento máximo de generación al décimo día del ciclo operativo. El comportamiento decreciente registrado a partir del día 18, ocasionado por el agotamiento gradual de la materia orgánica disponible, permitió establecer de manera fundamentada el día 21 como el momento de recarga óptimo, asegurando así la continuidad en el flujo de gas y el aprovechamiento máximo del inóculo.

Asimismo, la integración de un sistema de purificación por etapas demostró ser una estrategia altamente eficiente para refinar las propiedades del biocombustible; el uso de una trampa química de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) garantizó una remoción significativa de ácido sulfhídrico (H_2S), lo que no solo eliminó por completo la presencia de olores fétidos en el área de descarga, sino que previno de manera contundente los fenómenos de corrosión en las válvulas, conexiones y accesorios metálicos. Complementariamente, la trampa de agua encargada de retener el exceso de humedad en la corriente de salida, permitió una combustión mucho más eficiente y estable, la cual fue validada cualitativamente mediante la observación de una llama azul intensa y constante.

De este modo, el prototipo se consolida como una alternativa eficiente y de bajo costo que promueve activamente la sustentabilidad en el sector agropecuario, ya que mitiga el impacto ambiental adverso provocado por la dispersión de lixiviados y la disposición inadecuada de estiércol vacuno, transformando un pasivo ambiental crítico en un activo energético renovable y de fácil acceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. DelaVega-Quintero, J. C., Nuñez-Pérez, J., Lara-Fiallos, M., Barba, P., Burbano-García, J.L., & Espin-Valladares, R. (2025). Advances and challenges in anaerobic digestion for biogas production: Policy, technological, and microbial perspectives. Processes, 13(11),3648. https://doi.org/10.3390/pr13113648
2. Mecyplastec. (2024). Polietileno de alta densidad: propiedades y aplicaciones esenciales. https://mecyplastec.es/polietileno-de-alta-densidad-propiedades-y-aplicaciones-esenciales/
3. Arrieta, W. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado (Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.

4. Phillip, A., Bhatt, S. M., Sharma, N., & Poudel, B. (2024). Enhanced biogas production using anaerobic co-digestion of animal waste and food waste: A review. Journal of Scientific Research and Reports, 30(8), 761-781.
5. Martin-Sanz-Garrido, C., Revuelta-Aramburu, M., Santos-Montes, A. M., & Morales-Polo, C. (2025). A review on anaerobic digestate as a biofertilizer: Characteristics, production, and environmental impacts from a life cycle assessment perspective. Applied Sciences, 15(15), 8635.

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A BACTERICIDAS EN EL ESTABLECIMIENTO *IN VITRO* DE AGUACATE 'DUKE 7'

Isaí Monroy-González[1]; Libia I. Trejo-Téllez[2]; Fernando C. Gómez-Merino[3]; Gregorio Arellano-Ostoa[4]; Alejandro F. Barrientos-Priego[5]; Alma D. Abarca-Cervantes[6]; Eréndira E. Hernández-Andrade[7]

[1-4,6,7]Colegio de Postgraduados, [5]Universidad Autónoma Chapingo.
monroy.isai@colpos.mx

RESUMEN

El cultivo *in vitro* de aguacate presenta limitaciones durante la etapa de establecimiento debido a problemas de contaminación microbiana, necrosis y oxidación de los explantes. Se estableció un experimento completamente al azar con dos tratamientos (desinfestación con bactericida durante 15 min y 24 h) y 20 repeticiones. El medio de cultivo fue la solución Steiner al 10 % suplementado con 1 mg 6-benciladenina L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenoacético L^{-1}, 15 g sacarosa L^{-1}, 3 g agar L^{-1} y vitaminas a pH 5.7. De brotes etiolados de aguacate 'Duke 7' se obtuvieron explantes de 4 cm de longitud y se enjuagaron en agua corriente por 40 min. Posteriormente, los explantes se sometieron por inmersión a los tratamientos bactericidas: Fungimycin® 100 (estreptomicina 18.75 % + oxitetraciclina 2 %) en 1.2 g L^{-1} y Kasumin® (kasugamicina 2.3 %) en 4 mL L^{-1} por 15 min y 24 h. Al concluir el tiempo correspondiente, el protocolo continuó por inmersión con una mezcla de fungicidas (0.125 g Benomilo L^{-1}, 0.25 g Manzeb® 80WP L^{-1} y 0.25 g Captán 50WP L^{-1}) por 3 min, seguida de etanol al 70 % por 30 s, con enjuagues de agua destilada estéril durante 2 min entre etapas y al final. Se sembró un explante con dos yemas por tubo con medio de cultivo y se mantuvieron en un cuarto de crecimiento a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad durante 16 d. La inmersión por 24 h en bactericida redujo la presencia de bacteria y la sobrevivencia de explantes en 13 % en ambos casos, mientras que incrementó la incidencia de hongo, necrosis y oxidación del tejido en 9, 8 y 18 % respectivamente, en comparación con la inmersión por 15 min. Aunque la inmersión prolongada reduce la contaminación bacteriana, la pérdida de material vegetal por necrosis es mayor y se prolonga la etapa de establecimiento. Se concluye que, para la desinfestación bactericida en el establecimiento *in vitro* de aguacate 'Duke 7', la inmersión por 15 min es más eficiente que 24 h.

INTRODUCCIÓN

La propagación clonal de aguacate es una de las técnicas más complejas, inducir raíces adventicias en portainjertos de élite es un proceso difícil, largo y costoso. Una de las alternativas a los retos de la propagación clonal en campo es el cultivo *in vitro*, debido a la posibilidad de control de diversos factores como hormonales, nutricionales, ambientales, etc., además de permitir altas tasas de multiplicación (Hiti-Bandaralage *et al*., 2017).

El cultivo de tejidos consta de cinco etapas: preparación de la planta madre, establecimiento, multiplicación, enraizamiento y aclimatización; cada una con sus diferentes retos (Read & Preece, 2014). En el caso de la segunda etapa, el establecimiento en aguacate se ha reportado como algo complicado ya que presenta altas incidencias de contaminación por hongos y bacterias endógenas, además de necrosis, oxidación y estancamiento del crecimiento (Hiti-Bandaralage *et al*., 2017). La aplicación de tratamientos con bactericidas y fungicidas se ha realizado a planta madre y también una vez cortado el material vegetal, antes o durante el trabajo en campana de flujo laminar, mostrando diferentes resultados en las tasas de contaminación, oxidación o necrosis (García-Cabrera *et al*., 2025).

Es por ello que el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar dos tiempos de inmersión de explantes etiolados de aguacate en una mezcla de bactericidas agrícolas y su efecto en la sobrevivencia, oxidación, necrosis y contaminación por hongo o bacteria en su establecimiento *in vitro*.

TEORÍA

El éxito del establecimiento de explantes en cultivo *in vitro* depende principalmente de: manejo previo de la planta madre, tipo de material vegetal usado, tratamiento previo de los explantes antes de su establecimiento en condiciones asépticas y así como los componentes del medio de cultivo (Neumann *et al.,* 2020). Algunos de los tratamientos previos al establecimiento son de desinfestación, existen diferentes soluciones usadas y estas cambian en concentración y tiempo de exposición principalmente (Dagne *et al*., 2023), algunas de las más usadas son: alcohol, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, cloruro de mercurio, nitrato o nanopartículas de plata, fungicidas y bactericidas agrícolas, mostrando diferencias en contaminación, oxidación, necrosis y sobrevivencia de explantes (Parzymies, 2021; Keamkarn *et al*., 2025) (problemas muy frecuentes con aguacate). El uso de bactericidas es una herramienta importante ya que las plantas tienen bacterias endógenas que una vez puesto el explante en condiciones asépticas y con disponibilidad de nutrientes, éstas pueden manifestarse o crecer en el medio de cultivo afectando o limitando el crecimiento del explante (McCown & Lloyd, 1981; Ibarra-López *et al.,* 2016), es por ello que el material vegetal debe estar aparentemente libre de organismos endógenos.

PARTE EXPERIMENTAL

Se colectaron semillas de raza antillana de aguacate (*Persea americana* Mill.) provenientes de los límites de Puebla-Veracruz, se pusieron a germinar en fibra de coco y cuando la radícula alcanzó 1 cm de largo, se trasplantaron a tubetes forestales de 320 mL con mezcla de tezontle, turba y perlita (1:1:1, v:v:v) (Figura 1). Cuando el tallo alcanzó una altura de entre 20 y 25 cm, las plantas fueron injertadas con el portainjerto ‘Duke 7´, la altura de los injertos estuvo entre 3-5 cm. Aproximadamente un mes después cuando los injertos comenzaron a brotar, con 0.5-1 cm de crecimiento en yema, estos fueron llevados a un cuarto de etiolación por 40 días, hasta que los brotes alcanzaron una altura de 40-50 cm. La germinación, crecimiento, injertación y etiolación de los brotes se realizó en San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Estado de México (19.511º N -98.814º O).



Figura 1. Brotes etiolados de Duke 7 en tubete previo a ser cortados.

El establecimiento *in vitro* de explantes se realizó en el laboratorio de Biotecnología y frutales del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado en Montecillo, Estado de México (19.461º N, -98.910º O).

El medio basal fue solución Steiner al 10 % con 1 mg benciladenina L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenoacético L^{-1}, 15 g sacarosa L^{-1}, 50 mg mio-inositol L^{-1}, 5 g agar L^{-1} y vitaminas (WPM) (McCown & Lloyd, 1981), se ajustó pH a 5.7.

Con tijera de podar se cortaron los brotes etiolados de Duke 7 y se dividieron en estacas de ±10 cm. Los brotes cortados se metieron en bolsas y fueron transportados en frío con ayuda de una hielera, al llegar al laboratorio, se les retiraron las hojas y se volvieron a cortar en tamaños de 2-3 cm con al

menos 1-2 yemas por segmento. Se enjuagaron por 40 min en agua corriente. Luego, por inmersión se aplicaron los tratamientos con Fungimycin® 100 (estreptomicina 18.75 % + oxitetraciclina 2 %) en 1.2 g L^{-1} y Kasumin® (kasugamicina 2.3 %) en 4 mL L^{-1} por 15 min y 24 h. En campana de flujo laminar, se aplicaron por inmersión en una mezcla de fungicidas (0.125 g Benomilo L^{-1}, 0.25 g Manzeb® 80WP L^{-1} y 0.25 g Captán 50WP L^{-1}) por 3 min; y en etanol al 70 % por 30 s y enjuagues con agua destilada estéril durante 2 min entre etapas y al final.

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con 20 repeticiones por tratamiento. Se eliminaron aproximadamente de 3 a 5 mm de los extremos de cada explante en sus extremos y posteriormente se colocaron uno por tubo con medio de cultivo estéril (5 mL). y se mantuvieron en un cuarto de crecimiento a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad. Después de 16 días el número de explantes vivos, oxidados, con necrosis y contaminados por hongo o bacteria fue contabilizado.

RESULTADOS

En la Figura 2 se puede observar que los explantes que estuvieron sumergidos 24 horas en solución presentaron menos contaminación por bacteria (33.3 *vs* 46.15 %), sin embargo, estos presentaron: menor sobrevivencia (23.8 vs 30.7 %), más necrosis (61.9 *vs* 53.8 %), y más oxidación (33.3 vs 15.3%), además, fueron los únicos que presentaron contaminación fúngica en comparación con los explantes inmersos durante 0.25 h.

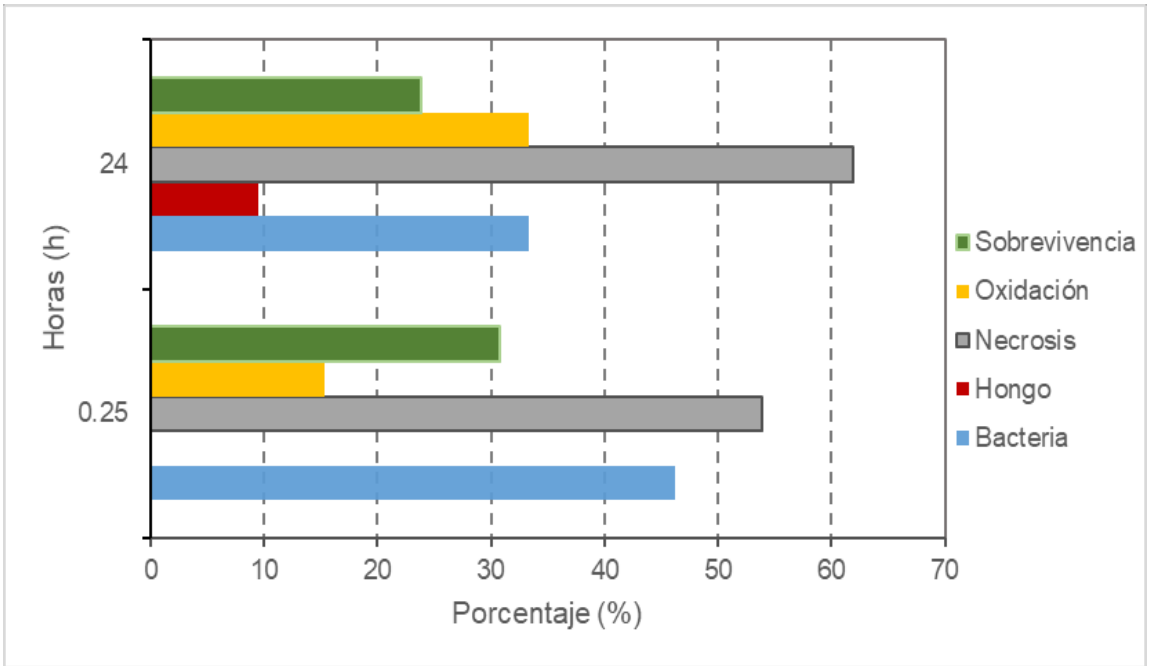


Figura 2. Porcentaje de Sobrevivencia, oxidación, necrosis y contaminación por hongo o bacteria en explantes de aguacate 'Duke 7' sometidos a dos diferentes tiempos de inmersión: 24 y 0.25 h (barras superiores e inferiores respectivamente); en mezcla de bactericidas (1.2 g de Fungimicin L^{-1} y 4 mL de Kasumin L^{-1}).

Existe evidencia de que la exposición controlada de explantes a bactericidas causó efectos fitotóxicos, aumentando la necrosis y oxidación, así como una disminución de la sobrevivencia y crecimiento de brotes *in vitro* (Biasi *et al.,* 1995; Ruiz-Berrío *et al.,* 2024).

El daño oxidativo es la principal causa de estos efectos fitotóxicos. Durante el establecimiento *in vitro*, el corte en el explante permite que los compuestos fenólicos entren en contacto con enzimas oxidativas como las polifenol oxidasas (PPO) y peroxidasas (POD) (Hernández & González, 2010). La exposición prolongada a bactericidas puede intensificar este proceso, favoreciendo la

acumulación excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS) y aumentando el daño oxidativo en los tejidos. Este exceso provoca la peroxidación de lípidos y la desnaturalización de proteínas, lo que se manifiesta como oscurecimiento de los tejidos (oxidación) y muerte celular programada (necrosis), afectando la supervivencia y el desarrollo de los brotes (Andriūnaitė *et al*., 2022; Jin *et al.,* 2023).

CONCLUSIONES

El tiempo de exposición a la solución bactericida influyó significativamente en el establecimiento *in vitro* de explantes de aguacate 'Duke 7'. Aunque la inmersión durante 24 h redujo la contaminación bacteriana, también incrementó la oxidación, necrosis y pérdida de explantes. Por lo tanto, la inmersión durante 15 min resultó ser el tratamiento más eficiente para la desinfestación bacteriana bajo las condiciones evaluadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Ibarra-López, M. del C. Ojeda-Zacarías, E. A. García-Zambrano, & A. Gutiérrez-Diez, "Inducción *in vitro* de brotes de dos cultivares de aguacate raza Mexicana *Persea americana* var. *drymifolia* Schltdl. & Cham", Rev. Mex. Cienc. Agríc., Vol. 7, 2, 2016, pp. 337-347.
2. B. H. McCown & G. Lloyd, "Woody plant medium (WPM)—A mineral nutrient formulation for microculture of woody plant species", HortScience, Vol. 16, 1981, pp. 453-453.
3. E. Andriūnaitė, I. Tamošiūnė, J. Vinskienė, V. Stanys, R. Rugienius, & D. Baniulis, "Enhanced carbonylation of photosynthetic and glycolytic proteins in antibiotic timentin-treated tobacco *in vitro* shoot culture", Plants, Vol. 11, 12, 1572, 2022.
4. F. García-Cabrera, M. Castro, R. Cautin, C. Estay, L. Guzmán, M. J. Marchant, & F. Guerra, "Optimizing *in vitro* establishment protocols for 'Merensky 2' avocado rootstock (*Persea americana* Mill.)", Horticulturae, Vol. 11, 8, 2025.
5. H. D. Ruiz-Berrío, M. Jaime-Guerrero, & J. G. Álvarez-Herrera, "Efecto de tratamientos de desinfección sobre explantes de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) para introducción *in vitro*", Entramado, Vol. 20, 1, 2024, pp. 1-10.
6. H. Dagne, V. Prabhu, H. Palanivel, A. Yeshitila, S. Benor, S. Abera, & A. Abdi, "Advanced modeling and optimizing for surface sterilization process of grape vine (*Vitis vinifera*) root stock 3309C through response surface, artificial neural network, and genetic algorithm techniques", Heliyon, Vol. 9, 8, e18628, 2023.
7. J. C. A. Hiti-Bandaralage, A. Hayward, & N. Mitter, "Micropropagation of avocado (*Persea americana* Mill.)", Am. J. Plant Sci., Vol. 8, 11, 2017, pp. 2898-2921.
8. J. Jin, L. Xu, S. Zhang, M. Jin, P. Zhang, L. Shen, J. Chen, Z. Li, W. Zhao, & H. Liu, "Oxidative response of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings to quinolone antibiotics and its correlation with phyllosphere microbes and antibiotic resistance genes", Sci. Total Environ., Vol. 867, 161544, 2023.
9. K. H. Neumann, A. Kumar, & J. Imani, "Plant Cell and Tissue Culture –A Tool in Biotechnology: Basics and Application", 2nd ed., Springer, 2020, pp. 26-38.
10. L. A. Biasi, G. B. B. Almeida & R. M. C. de Oliveira, "Fitotoxicidade de três antibióticos na cultura *in vitro* de abacateiro", Pesquisa Agropecuária Brasileira, Vol. 30, 9, 1995, pp. 1121-1126.
11. M. Parzymies, "Nano-silver particles reduce contaminations in tissue culture but decrease regeneration rate and slows down growth and development of *Aldrovanda vesiculosa* explants", Appl. Sci., Vol. 11, 8, 3653, 2021.
12. P. E. Read & J. E. Preece, "Cloning: Plants –Micropropagation/Tissue Culture", in Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, N. K. Van Alfen, Ed., 2nd ed., Elsevier, 2014, pp. 317-336.
13. T. Keamkarn, R. Chuengpanya, & A. Siangsuepchart, "Effect of Osil® application on the explant surface sterilization procedure of *Rosa chinensis* Jacq.", Thai Sci. Technol. J., Vol. 33, 3, 2025, pp. 38-51
14. Y. Hernández & M. E. González, "Efectos de la contaminación microbiana y oxidación fenólica en el establecimiento *in vitro* de frutales perennes", Cultivos Tropicales, Vol. 31, 4, 2010, pp. 75-81.

RESPUESTA DE LA GERMINACIÓN DE TOMATE AL SUMINISTRO DE CERIO (CE) BAJO CONDICIONES DE SALINIDAD

Ángel Mena-García, Libia I. Trejo-Téllez, Fernando C. Gómez-Merino, Tsujmejy Gómez-Navor.

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.
tlibia@colpos.mx

RESUMEN

La germinación de las semillas es la etapa inicial del crecimiento de las plantas, en donde se desencadena una serie de cambios bioquímicos, enzimáticos y de síntesis de hormonas, que da por terminada la latencia de las semillas. Esta etapa es indispensable para el desarrollo exitoso de material vegetal; sin embargo, factores de estrés abiótico como la salinidad pueden reducir los parámetros de germinación y, por tanto, afectar en forma negativa la generación de material vegetal para posterior trasplante. El cerio (Ce) es un bioestimulante inorgánico que tiene influencia significativa en la regulación de la homeostasis contra la salinidad. El presente estudio evaluó los parámetros de germinación en tomate bajo salinidad. Se estableció un experimento bifactorial al azar bajo condiciones de laboratorio. El factor Ce se probó a cuatro niveles (0, 5, 10, 20 μM $CeCl_3$ $7H_2O$), y el mismo número de niveles fue probado para el factor salinidad (0, 15, 30 y 50 mM NaCl). Se colocaron 20 semillas de tomate cv. Rio Grande sobre papel filtro contenido en caja Petri de 15 × 90 mm, el cual se hidrató con 4 mL de cada una de las 16 soluciones preparadas en agua destilada. Las semillas se mantuvieron durante 6 d en incubación a 28 ºC en una incubadora. Al final del experimento se evaluó el porcentaje de germinación (PG), el tiempo promedio de germinación (TPG), el coeficiente de velocidad de germinación (CVG) y la velocidad de germinación (VG). Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). El PG se redujo bajo 50 mM NaCl con el suministro de 5 y 20 μM Ce en comparación con el tratamiento “sin NaCl + 0 μM Ce”. Por otra parte, hubo efecto principal significativo de los niveles de NaCl en el TPG y el CVG. El TPG incrementó hasta 32.96 % con el suministro de 50 mM NaCl. Asimismo, el CVG se redujo en 4.09 % y 25.23 % con el suministro de 15 y 50 mM NaCl, respectivamente en comparación con las semillas sin aplicación de NaCl. Adicionalmente, la VG se afectó bajo el tratamiento “50 mM NaCl + 5 μM Ce” y “50 mM NaCl + 20 μM Ce”. Se concluye que la aplicación de 50 mM NaCl altera negativamente los parámetros de germinación en semillas de tomate y que la aplicación de Ce no generó efecto benéfico en la etapa de germinación.

INTRODUCCIÓN

La germinación de las semillas es una de las etapas más importantes durante el ciclo de vida de las plantas, la cual precede a la producción de plántulas y en la que ocurren cambios moleculares y fisiológicos, entre los que se incluye la activación de enzimas y la producción de energía. Este proceso comienza con la imbibición de las semillas, la absorción de agua y la emergencia de la radícula, y requiere del cumplimiento de condiciones ambientales ideales como la temperatura, la luz, el oxígeno y la humedad para la obtención de plántulas de calidad (Özden *et al*., 2025).

La salinidad es un factor de estrés abiótico que afecta la germinación, el desarrollo y la productividad vegetal, al limitar la absorción de agua y nutrientes y provocar desbalance nutrimental y estrés oxidativo (Zhao *et al*., 2021). El tomate es un cultivo sensible a la salinidad, especialmente durante la germinación y el crecimiento temprano de las plántulas, en donde la salinidad retrasa la germinación, reduce la tasa de germinación, altera la actividad de enzimas clave y los niveles de giberelina (GA) y reduce la absorción de agua (Guo *et al*., 2022), lo que puede conducir a la obtención de menor cantidad de material vegetal para trasplante a campo o a sustrato en agricultura protegida. La bioestimulación inorgánica constituye una estrategia de manejo agrícola basada en la aplicación de sustancias benéficas que, en las concentraciones adecuadas, potencian los mecanismos bioquímicos y moleculares de adaptación de las plantas frente a condiciones de estrés. El Ce es un

bioestimulante inorgánico que al suministrarse a los cultivos puede facilitar la germinación bajo estrés salino al estimular en tres niveles la respuesta bioquímica y molecular: regulación osmótica, iónica y oxidativa (An *et al*., 2020). Esta estimulación positiva frecuentemente se obtiene en dosis bajas y depende de la forma y frecuencia de aplicación, la fuente de Ce utilizada y el cultivo y el genotipo incluso bajo condiciones de crecimiento sin estrés salino (Agathokleous *et al*., 2022). El objetivo de este trabajo consistió en evaluar el efecto del $CeCl_3$ $7H_2O$ en parámetros de germinación de semillas de tomate cv. Río Grande bajo estrés salino.

TEORÍA

La germinación de las semillas es un proceso fisiológico que consta de tres etapas: fase de imbibición, fase de retraso y emergencia de la radícula. Durante esta etapa, las condiciones ambientales juegan un papel importante en el cumplimiento de la generación de plántulas sanas y fuertes para su uso en la agricultura. Alteraciones en la absorción de agua y nutrientes y cambios en el pH del suelo pueden afectar drásticamente la germinación de las semillas (Özden *et al.,* 2025). La salinidad de los suelos es un factor abiótico importante que afecta la capacidad de las plantas para abastecerse de agua y nutrientes en todas las etapas fenológicas, lo cual conduce a una alteración en los procesos fisiológicos como la fotosíntesis, y bioquímicos en el funcionamiento de enzimas clave del metabolismo que afectan la acumulación de biomasa y la productividad (Zhao *et al*., 2021).

Los bioestimulantes son sustancias o microorganismos que al aplicarse a las plantas benefician la adaptación de estas a situaciones de estrés abiótico e incluye las siguientes categorías: 1) ácidos húmicos y fúlvicos, 2) hidrolizados de proteínas y compuestos que contienen nitrógeno, 3) extractos de algas marinas y productos botánicos, 4) quitosano y otros biopolímeros, y 5) compuestos orgánicos (Du Jardin, 2015). El cerio (Ce) es un elemento considerado un bioestimulante inorgánico y su suministro a dosis pequeñas induce cambios metabólicos que benefician la germinación, el crecimiento de las plantas y la acumulación de biomasa en condiciones de estrés salino (An *et al.,* 2020; Sobarzo-Bernal *et al.,* 2021). En condiciones normales, se ha informado en tomate que la imbibición de semillas incrementa el peso de estas después de un periodo de 12 h de imbibición (Sobarzo-Bernal *et al.,* 2021). De la misma manera, en arroz, las dosis de 8 y 12 μM Ce incrementaron la absorción de agua al mejorar el peso fresco y la acumulación de biomasa seca (Ramírez-Olvera *et al*., 2018). En *Gossypium hirsutum* L. se informó que el pretratamiento de la semilla con nanopartículas de dióxido de Ce (NPs-CeO_2) incrementó la acumulación de biomasa fresca y seca, mejoró la estructura de la raíz e incrementó la absorción de K^+ y Ca^{2+} para beneficiar la homeostasis iónica bajo estrés salino (An *et al*., 2020).

PARTE EXPERIMENTAL

Establecimiento del experimento

Veinte semillas de tomate cv. Río Grande se colocaron sobre papel filtro de poro medio contenido en placas Petri de 90 × 15 mm. A partir de estas se diseñó un experimento bifactorial 4 × 4 al azar en el que los factores fueron: Ce (0, 5, 10 y 20 μM Ce) y NaCl (0, 15, 30 y 50 mM), con un total de 16 tratamientos. Cada tratamiento se conformó de cuatro réplicas, en la que una réplica y unidad experimental consistió en una caja Petri con veinte semillas.

El papel filtro se hidrató inmediatamente con 4 mL de la solución correspondiente preparada en agua destilada. El Ce se adicionó a partir de $CeCl_3$ $7H_2O$ (Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO, EE. UU.). Las semillas se incubaron durante 6 d a 28 ºC y se monitorearon diariamente. Una semilla se consideró germinada cuando la longitud de la radícula fue ≥ 2 mm. El tiempo de evaluación se seleccionó en función de otro informe (Ofoe *et al.,* 2022). Después de 6 d de tratamiento se determinó el porcentaje de germinación (PG) todos los días (Sultana *et al.,* 2021; Hmissi *et al.,* 2023), el tiempo promedio de germinación (TPG) (Sultana *et al.,* 2021; Hmissi *et al.,* 2023), el coeficiente de velocidad de germinación (CVG) (Sultana *et al.,* 2021) y la velocidad de germinación (VG) (González-Zertuche *et al*., 1996), con las fórmulas del **Cuadro 1.**

Cuadro 1. Fórmulas para calcular los parámetros de germinación de semillas de tomate.

Fórmulas			
$PG = \frac{Ni}{Nts}$	$TPG = \frac{\Sigma Ni \times Ti}{Tsg}$	$CVG = \frac{\Sigma Ni}{\Sigma Ni \times Ti} \times 100$	$VG = \Sigma\left(\frac{Ni}{Tf}\right)$

PG, porcentaje de germinación; Ni, número de semillas germinadas cada día; Nts, número total de semillas; TPG, tiempo promedio de germinación; Ti, Número de días transcurridos desde el inicio del experimento; Tsg, total de semillas germinadas al final del experimento; VG, velocidad de germinación; Tf, día que se realizó la evaluación final.

Análisis de datos

Los datos se sometieron al análisis de varianza (ANOVA) de manera multifactorial para determinar el efecto de la interacción doble Ce ×NaCl y de los efectos principales ($P \leq 0.05$). Los parámetros de germinación evaluados que fueron significativos se sometieron a la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) con el software R versión 4.1.1 (R Core Team, 2021). Los parámetros que resultaron significativos en la interacción doble en el ANOVA, no se consideraron para determinar el efecto principal por medio de la prueba Tukey.

RESULTADOS

Parámetros de germinación

Los bioestimulantes orgánicos o inorgánicos suministrados en las concentraciones adecuadas a las semillas pueden tener un efecto benéfico en la germinación de las mismas. El pretratamiento de las semillas incluso puede beneficiar a nivel bioquímico y fisiológico la respuesta de las plantas a eventos de estrés abiótico y mejorar el crecimiento, la acumulación de biomasa, el rendimiento y la calidad de la cosecha (Zulfiqar *et al*., 2021). Los parámetros de germinación, como porcentaje de germinación (PG), tiempo promedio de germinación (TPG), coeficiente de velocidad de germinación (CVG), velocidad de germinación (VG), entre otros, han sido utilizados para abordar el papel benéfico de los bioestimulantes inorgánicos (Alsaeedi *et al*., 2019). El ANOVA del PG, TPG, CVG y VG se muestran en el **Cuadro 2**. De acuerdo con este, hubo efecto entre las medias del PG4, PG6 y VG en la interacción doble "NaCl ×Ce". Asimismo, el NaCl tuvo efecto significativo entre las medias de los tratamientos en el PG3, PG5, TPG y CVG. Por otra parte, el Ce no tuvo efecto significativo entre la media de los tratamientos en los parámetros de germinación.

Cuadro 2. ANOVA del efecto del cerio (Ce), el cloruro de sodio (NaCl) y la interacción de los dos factores en los parámetros de germinación de semillas de tomate cv. Río Grande.

Fuente de variación	PG3	PG4	PG5	PG6	TPG	CVG	VG
Ce	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
NaCl	***	***	***	***	***	***	***
NaCl × Ce	ns	*	ns	*	ns	ns	*
CV (%)	24.13	12.63	8.37	6.81	3.53	3.56	6.80

ns: no significativo; *: estadísticamente significativo ($p \leq 0.05$),); ***: ($p \leq 0.001$). PG: porcentaje de germinación a los 3 d, 4 d, 5 d y 6 d; TPG: tiempo promedio de germinación; CVG: coeficiente de velocidad de germinación; VG: velocidad de germinación.

El porcentaje de germinación mostró una tendencia similar a los 4 y 6 días de evaluación. No hubo diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$) de la aplicación de las dosis de Ce en comparación con las semillas sin suministro de Ce bajo todos los niveles de NaCl. Por otra parte, el NaCl redujo la germinación solo en la concentración más alta de NaCl (50 mM) bajo todas las concentraciones de Ce (**Figura 1**). A los 6 d, la aplicación de 15 y 30 mM NaCl no redujo la germinación de las semillas en comparación con el control sin salinidad (0 mM NaCl +0 µM Ce). Curiosamente, bajo 50 mM NaCl, la aplicación de 5 y 20 µM Ce redujo el PG en 8.75 y 6.25 %, respectivamente en comparación con el tratamiento "50 mM NaCl + 0 µM Ce" **(Figura 2).**

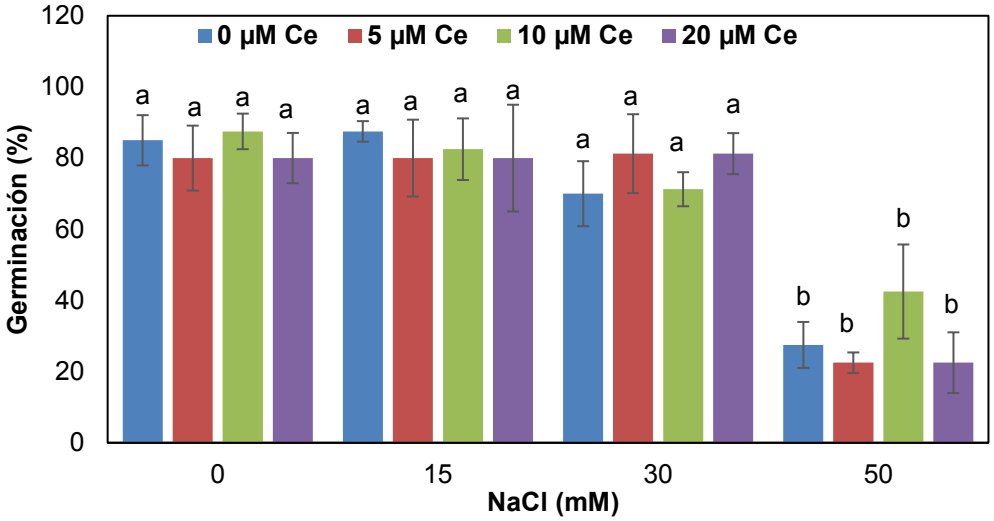


Figura 1. Efecto de la interacción cerio (Ce) × cloruro de sodio (NaCl) en el porcentaje de germinación de tomate cv. Río Grande a los 4 d. Media ± DE con letra diferente en cada tratamiento indica diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$) n=4.

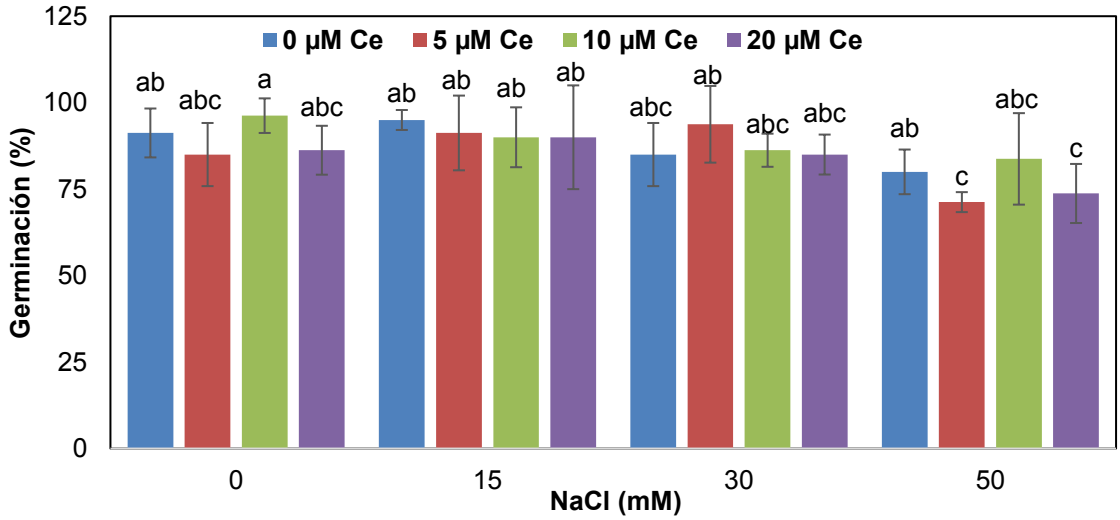


Figura 2. Efecto de la interacción cerio (Ce) × cloruro de sodio (NaCl) en el porcentaje de germinación de tomate cv. Río Grande a los 6 d. Media ± DE con letra diferente en cada tratamiento indica diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$), n=4.

A los 3 y 5 d, todos los niveles de NaCl redujeron significativamente el PG de las semillas. De acuerdo con la prueba Tukey ($P \leq 0.05$), a los 3 d, la aplicación de 15, 30 y 50 mM NaCl redujo en 10.93, 32.81, 52.5 % el PG, respectivamente en comparación con las semillas sin NaCl. Por otra parte, a los 5 d, el PG solo se redujo 19.37 % bajo 50 mM NaCl (**Figura 3**).

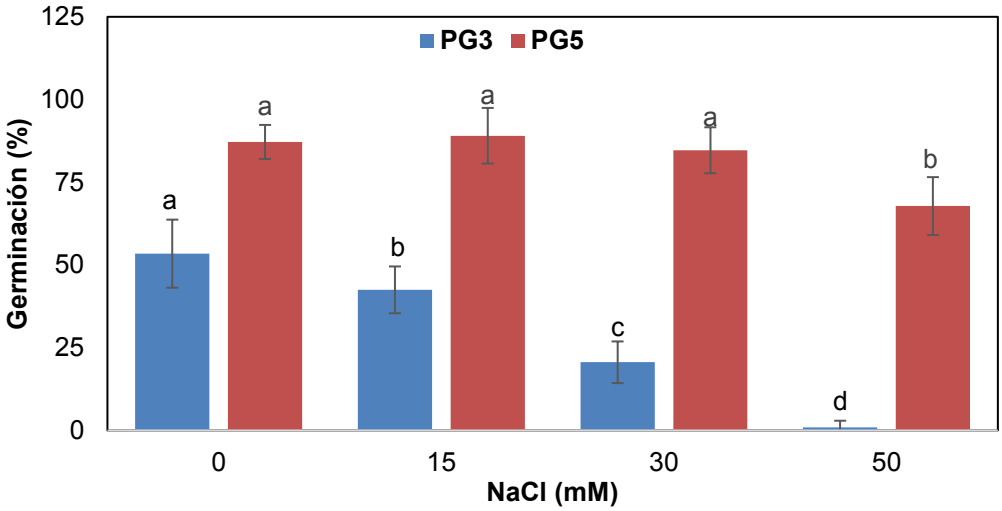


Figura 3. Efecto del NaCl en el porcentaje de germinación(PG) de semillas de tomate cv. Río Grande a los 3 (PG3) y 5 d (PG5). Media ± DE con letra diferente en cada nivel de NaCl indica diferencia estadística significativa en el PG de cada día (Tukey, $P \leq 0.05$), n=16.

Al final del experimento, el TPG se incrementó con el incremento en la concentración de NaCl. El incremento en el TPG fue de 4.2, 12.57 y 33.71 % bajo el suministro de 15, 30 y 50 mM NaCl en comparación con el suministro de 0 mM NaCl. El CVG también se redujo gradualmente a medida que se incrementó la concentración de NaCl (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Efecto del cloruro de sodio (NaCl) en el TPG y CVG de semillas de tomate cv. Río Grande.

NaCl (mM)	TPG	CVG
0	3.50±0.12 a	28.57±1.03 a
15	3.65±0.12 b	27.40±0.90 b
30	3.94±0.14 c	25.35±0.88 c
50	4.68±0.18 d	21.36±0.88 d

TPG: tiempo promedio de germinación; CVG: coeficiente de velocidad de germinación. Media ± DE con letra diferente entre niveles de NaCl en cada parámetro de germinación indica diferencia estadística significativa. (Tukey, $P \leq 0.05$), n=16.

La velocidad de germinación no cambió drásticamente bajo la aplicación de las diferentes dosis de Ce en condiciones de salinidad. De hecho, solo bajo los tratamientos “50 mM NaCl + 5 µM Ce” y “50 mM NaCl + 20 µM Ce” hubo una reducción de la VG en comparación con el tratamiento “0 mM NaCl + 0 µM Ce” (**Figura 4**).

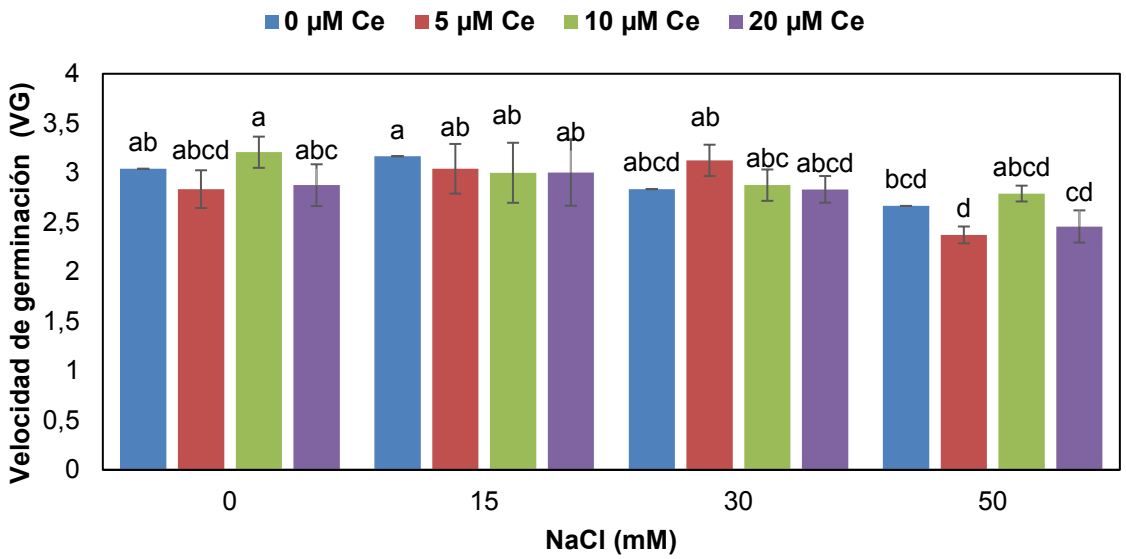


Figura 4. Efecto de la interacción del cloruro de sodio (NaCl) × cerio (Ce) en la velocidad de germinación (VG) de semillas de tomate cv. Río Grande a los 6 d. Media ± DE con letra diferente en cada tratamiento indica diferencia estadística significativa (Tukey, $P \leq 0.05$), n=4.

Se ha informado que concentraciones bajas de Ce en forma de compuesto o nanopartículas (NPs) promueven la germinación de las semillas y el crecimiento temprano (Ramírez-Olvera *et al*., 2018; Sobarzo-Bernal *et al*., 2021; Agathokleous *et al*., 2022). Los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran que la salinidad redujo drásticamente el PG a los 3 d en todas las concentraciones de NaCl, y a los 4 y 5 d bajo la aplicación de 50 mM NaCl. Estos resultados pueden estar asociados a una adaptación de las semillas a las concentraciones elevadas de NaCl en el transcurso de los días. Asimismo, todas las concentraciones de NaCl incrementaron el tiempo promedio de germinación (TPG) y redujeron el coeficiente de velocidad de germinación (CVG), evidenciando un retraso en el proceso germinativo bajo condiciones de salinidad. En arroz, se informó que la aplicación de 8 y 12 µM $CeCl_3$ $7H_2O$ incrementó la germinación y mejoró la acumulación de biomasa fresca y seca de raíces y vástago (Ramírez-Olvera *et al*., 2018). Asimismo, se informó que el Ce en bajas concentraciones puede mejorar la germinación de tomate y promover el crecimiento temprano, después de un periodo de imbibición de 12 h. Por otra parte, el CVG tampoco presentó cambios en tomate cv. Vengador a la aplicación de 5, 10 y 15 µM $CeCl_3$ $7H_2O$, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en esta investigación (Sobarzo-Bernal *et al*., 2021). Estos datos corroboran que las dosis de Ce tienen efectos diferenciales también en función del genotipo y cultivo.

CONCLUSIONES

La salinidad afectó negativamente los parámetros de germinación de semillas de tomate cv. Rio Grande, particularmente a la concentración de 50 mM NaCl. El incremento de la salinidad prolongó el tiempo promedio de germinación y redujo el coeficiente de velocidad de germinación. Bajo las condiciones evaluadas, la aplicación de $CeCl_3$ $7H_2O$ no mostró efectos benéficos en los parámetros de germinación, lo que sugiere que las dosis empleadas no fueron suficientes para mitigar los efectos del estrés salino durante esta etapa del desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. H. Alsaeedi, M. M. Elgarawany, H. El-Ramady, T. Alshaal, A. O. A. Al-Otaibi, “Application of silica nanoparticles induces seed germination and growth of cucumber (*Cucumis sativus*)”, JKAU: Met. Environ. Arid. Land Agric., Sci, 28, 2019, pp. 57-68.

2. E. Agathokleous, B. Zhou, C. Geng, J. Xu, C. J. Saitanis, Z. Feng, F. M. G. Tack, J. Rinklebe, “Mechanisms of cerium-induced stress in plants: A meta-analysis”. Sci. Total Environ., Vol. 852, 158352, 2022.
3. E. Özden, S. Ermiş, E. Yildirim, I. Demir, “Perspective Chapter: Insights into Seed Germination–Physiological and Environmental Mechanisms” in *New Perspectives on Seed Germination* (Intech Open, 2025), pp. 1-19.
4. F. Zulfiqar, “Effect of seed priming on horticultural crops”, Sci. Hort., Vol. 286, 2021, 110197.
5. J. An, P. Hu, F. Li, H. Wu, Y. Shen, J. C. White, X. Tian, Z. Li, J. P. Giraldo, “Emerging investigator series: molecular mechanisms of plant salinity stress tolerance improvement by seed priming with cerium oxide nanoparticles”, Environ.Sci.: Nano., Vol. 7, 8, 2020, pp. 2214-2228.
6. L. González-Zertuche, A. Orozco-Segovia, “Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*”, Bot. Sci., Vol. 58, 1996, pp.15-30.
7. M. Guo, X. S. Wang, H. D. Guo, S. Y. Bai, A. Khan, X. M. Wang, Y. M. Gao, J. S. Li, “Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: A review”, Front. Plant Sci., Vol.13, 949541, 2022.
8. M. Hmissi, M. Chaieb, A. Krouma, “Differences in the physiological indicators of seed germination and seedling establishment of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars subjected to salinity stress”, Agronomy, Vol. 13, 2, 1718, 2023.
9. O. Sobarzo-Bernal, F. C. Gómez-Merino, G. Alcántar-González, C. Saucedo-Veloz, L. I. Trejo-Téllez, “Biostimulant effects of cerium on seed germination and initial growth of tomato seedlings”, Agronomy, Vol. 11, 8, 1525, 2021.
10. P. Du Jardin, “Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation”, Sci. Hort., Vol. 196, 2015, pp. 3-14.
11. R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: https://www.R-project.org/.
12. R. Ofoe, L.R. Gunupuru, G. Wang-Pruski, B. Fofana, R.H. Thomas, L. Abbey, “Seed priming with pyroligneous acid mitigates aluminum stress, and promotes tomato seed germination and seedling growth”, Plant Stress, Vol. 4, 100083, 2022.
13. S. M. Ramírez-Olvera, L. I. Trejo-Téllez, S. García-Morales, J. A. Pérez-Sato, F. C. Gómez-Merino, “Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice”, PLoS One, Vol. 13, 3, e0194691, 2018.
14. S. Zhao, Q. Zhang, M. Liu, H. Zhou, C. Ma, P. Wang, “Regulation of plant responses to salt stress”, Int. J. Mol. Sci., Vol. 22, 9, 4609, 2021.
15. Z. Sultana, M. Hossain, M. A. Mannan, M. M. Islam, “Effect of NaCl Salinity on Various Parameters of Seed Germination of Cashew Nut (*Anacardium occidentale* L.)”, in *Transforming Coastal Zone for Sustainable Food and Income Security: Proceedings of the International Symposium of ISCAR on Coastal Agriculture, March 16-19, 2021* (Cham: Springer International Publishing, 2022), pp. 237-251.

BIOESTIMULACIÓN CON LUZ LED (AZUL, ROJA Y AZUL + ROJA) Y SU IMPACTO EN EL CONTENIDO DE ALCALOIDES DE *Ruta Chalepensis*

Paola Susana Alcaraz Tapia[1], Sofía Loza Cornejo[1], Martin Ortiz Morales[2], María de la Luz Miranda Beltrán[1], Paola Trinidad Villalobos Gutiérrez[1], Jesús Castañeda Contreras[1], Celia Guadalupe Pedroza Pedroza[1] y Neidy Ximena Haro Moya[1]

[1]Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, [2]Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

paola.alcaraz.tapia@hotmial.com

RESUMEN

Ruta chalepensis, comúnmente conocida como ruda, es un arbusto perenne de la familia Rutaceae; se caracteriza por desprender un aroma intenso y por sus propiedades medicinales, atribuidas principalmente a metabolitos secundarios como los alcaloides. Estos compuestos cumplen funciones defensivas frente a insectos, virus y bacterias, además de poseer actividad farmacológica. Las luces LED de diferentes longitudes de onda han cobrado importancia en la fisiología vegetal, ya que pueden inducir la acumulación de metabolitos primarios y secundarios. El objetivo de este trabajo fue evaluar el contenido de alcaloides en *Ruta chalepensis* mediante extracción con solventes de distinta polaridad (etanol 80%, metanol 80% y agua) y análisis histoquímicos en tejidos de plantas sometidas a tratamientos de luz LED azul, roja, azul+roja y un grupo control (luz natural). Los resultados mostraron que el solvente metanólico permitió detectar alcaloides en todos los tratamientos con luz LED, mientras que en las pruebas histoquímicas se observó la presencia de estos compuestos tanto en hojas y tallos de plantas expuestas a luz LED roja y a la combinación de LED azul+roja. En conclusión, los hallazgos sugieren que la exposición a luces LED de diferente longitud de onda favorece la producción de alcaloides en *Ruta chalepensis*, reforzando su capacidad defensiva.

INTRODUCCIÓN

Ruta chalepensis L., comúnmente conocida como ruda, es una hierba perenne caracterizada por tallos y hojas de tonalidad verde-azulada (Figura 1), las cuales desprenden un aroma característico. Tradicionalmente, esta especie ha sido utilizada en diversas culturas del Mediterráneo, Oriente Medio y el Norte de África por sus propiedades terapéuticas (Coimbra y col., 2020).



Figura 1. Planta de *Ruta chalepensis*. Fuente: imagen propia

Las especies de *Ruta* contienen diversas sustancias bioactivas, entre las que se encuentran los flavonoides, alcaloides, cumarinas y aceites esenciales, que potencian sus numerosas actividades

biológicas, como las actividades antioxidantes, citotóxicas, antihemolíticas, antibacterianas, etc., (Szewczyk y col., 2022; Elizondo-Luévano y col., 2023).

La luz que reciben las plantas es captada principalmente por la clorofila sobre todo en las regiones rojo y azul del espectro electromagnético. Esta utiliza la energía de la luz solar para transformar el agua y el dióxido de carbono (CO_2) en oxígeno y moléculas orgánicas complejas como el almidón. Este proceso se conoce como fotosíntesis (Bures y col., 2018). La eficiencia fotosintética de la luz depende directamente de su longitud de onda, ya que la radiación fotosintéticamente activa (PAR) comprende el rango que va desde los 400 a 700 nm. Dentro del espectro visible, las hojas verdes presentan una mayor absorbancia en las regiones azul y roja, donde los pigmentos de la clorofila captan la energía lumínica para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. En contraste, la luz verde es escasamente absorbida, lo que explica el color característico de las hojas (Zhen y col., 2019).

Actualmente, la iluminación artificial es ampliamente utilizada debido a que mejora las características morfológicas, fisiológicas y el contenido químico de algunos cultivos. Es por ello que se utilizan generalmente los diodos emisores de luz (LED), ya que ofrecen ventajas como un espectro monocromático, menor generación de calor, ahorro de energía y larga vida útil (Kim y col., 2004). Estas ventajas convierten a este tipo de luz en una fuente ideal para la regular de manera artificial el crecimiento y desarrollo de las plantas y cultivos (Amoozgar y col., 2017).

TEORÍA

Muchas plantas sintetizan una amplia gama de metabolitos secundarios que actúan como compuestos tóxicos o como mecanismos de defensa frente al ataque de herbívoros y patógenos. Esta diversidad química constituye una de las principales estrategias adaptativas para enfrentar las múltiples amenazas ambientales potenciales (Joosten y van Veen, 2011). En particular, los alcaloides destacan por su potente actividad antimicrobiana e insecticida. Se ha demostrado que varios de ellos, como la nicotina, la chaconina y la solanina, presentan toxicidad contra Insectos fitófagos de aparato bucal masticador (por ejemplo, *Spodoptera exigua*, *Manduca sexta* y *Tecia solanivora*), así como contra insectos chupadores, incluidos las moscas blancas, los pulgones y los chapulines (Kortbeek y col., 2019).

Entre los alcaloides furoquinolínicos presentes en *Ruta chalepensis* se han identificado los siguientes compuestos: arborinina, arborotina, rutamina, graveolina, graveolinina, 6-metoxidictamina, furoquinolina, τ-fagarina, γ-fagarina, kokusaginina, skimianina, cocusaginina, rutacridona, metilacridona, dictamnina e isogravacridonclorina (furanocridona) (Coba-Olmedo, 2022).

La intensidad y la longitud de onda de la luz desempeñan un papel fundamental en la activación de vías biosintéticas de metabolitos secundarios específicas en numerosas especies vegetales (Fazal y col., 2016). Según la especie, se requiere una calidad lumínica y unas condiciones de tratamiento optimizadas para inducir la reprogramación metabólica deseada, lo que permite potenciar la biosíntesis de metabolitos objetivo (Kuo y col., 2015; Nadeem y col., 2019).

Además de la clorofila, las plantas poseen diversos fotorreceptores que les permiten captar longitudes de onda específicas. Estos se clasifican en criptocromos, fitocromos y fototropinas, cada uno de los cuales desencadena efectos distintos en el desarrollo y comportamiento vegetal, como se describe a continuación (Bures y col., 2018):

- Las fototropinas [UV-A (315-400 nm) y azul (440-490 nm)] inciden en la ubicación de los cloroplastos y en la apertura estomática.
- Los criptocromos [UV-A (315-400 nm) y azul (440-490 nm)] están relacionados con las respuestas morfogenéticas, como la inhibición del alargamiento de los tallos, la expansión de los cotiledones, la producción de antocianos y la floración.
- Los fitocromos [luz roja (660 nm) e infrarroja (730 nm)] se encargan principalmente de hacer florecer a las plantas. Afectan a la elongación de los tallos y la expansión de las hojas.

PARTE EXPERIMENTAL

Las plantas de *Ruta chalepensis* se adquirieron de manera comercial; se seleccionaron de acuerdo a su estado de sanidad y un tamaño homogéneo. Posteriormente, se colocaron en cámaras de crecimiento bajo luz LED roja, azul y una combinación de LED azul+roja (n = 5, por triplicado) durante un periodo de seis semanas, con un fotoperiodo de 12 h de luz y 12 h de oscuridad.

Al finalizar el tratamiento, las plantas fueron extraídas del sustrato, lavadas cuidadosamente con agua destilada y seccionadas en fragmentos pequeños. Una fracción del material vegetal se destinó a la realización de análisis histoquímicos, mientras que la otra parte se dejó secar a temperatura ambiente hasta alcanzar una pérdida de agua superior al 90 %.

Análisis fitoquímico

Una vez secas las muestras se molieron hasta obtener un polvo fino con un procesador de alimentos y se maceraron en diferentes solventes de menor a mayor polaridad (etanol 80%, metanol 80% y agua) con una relación de 1:15 (gr de muestra/ml de solvente) durante 48 horas cada uno en recipientes de vidrio tapados con papel aluminio para evitar la luz. Finalmente, cada muestra se filtró al vacío y los extractos se colocaron en recipientes cubiertos con papel aluminio y se mantuvieron en refrigeración a 5°C hasta su uso.

Para la identificación de la presencia de alcaloides se llevó a cabo la metodología de Domínguez (1973), Miranda y Cuéllar (2001).

Prueba de Wagner. Se tomó 1ml de extracto y se evaporó el solvente, el residuo se disolvió en 1ml de HCl (ácido clorhídrico) al 10%, y se mezcló con algunas gotas del reactivo. Para considerar que la prueba es positiva cuando aparece un precipitado color café.

Análisis histoquímico

Mediante pruebas histoquímicas se determinó de manera cualitativa (presencia/ausencia) la localización de alcaloides utilizando el reactivo de Wagner en distintos órganos de *Ruta chalepensis*, como son tallos y hojas, describiendo su distribución en el tejido. Para los análisis se realizaron cortes a mano alzada en el tallo, mientras que en las hojas la observación se efectuó de manera superficial. La reacción fue positiva, evidenciada por la aparición de coloraciones anaranjadas y marrones, indicativas de la presencia de alcaloides.

RESULTADOS

Se muestra en el Cuadro 1 los resultados de pruebas fitoquímicas en las plantas de ruda provenientes de diferentes tratamientos con luces LED; se destaca el T3 (LED roja) donde se observó la presencia de alcaloides en todos los extractos utilizados. Mientras que en el T2 (LED azul) y T4 (LED azul+roja) solo se observó la presencia de este metabolito en el extracto metanólico.

Cuadro 1. Resultados de las pruebas fitoquímicas para alcaloides en diferentes solventes de plantas de *Ruta chalepensis* provenientes de los tratamientos con luces LED.

Metabolitos secundarios		Solvente/Tratamiento											
		Etanol 80%				Metanol 80%				Agua			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Alcaloides	Wagner	+	-	+	-	+	+	+	+	+	-	+	-

El signo (-) indica ausencia de ese metabolito secundario en el extracto. El signo (+) indica presencia de ese metabolito secundario en el extracto.
Tratamientos: T1 (Control), T2 (LED azul), T3 (LED roja), T4 (LED azul+roja) (n=6).

En la Figura 2 se observa la presencia y distribución de alcaloides (coloraciones naranja a marrón) en los diferentes tejidos (hojas y tallo) de plantas de ruda provenientes de los diferentes tratamientos con luces LED.

De manera general se puede observar la presencia de alcaloides distribuidos en todos los tejidos de todos los tratamientos con luces LED en la planta de ruda, indicando la presencia de este metabolito.

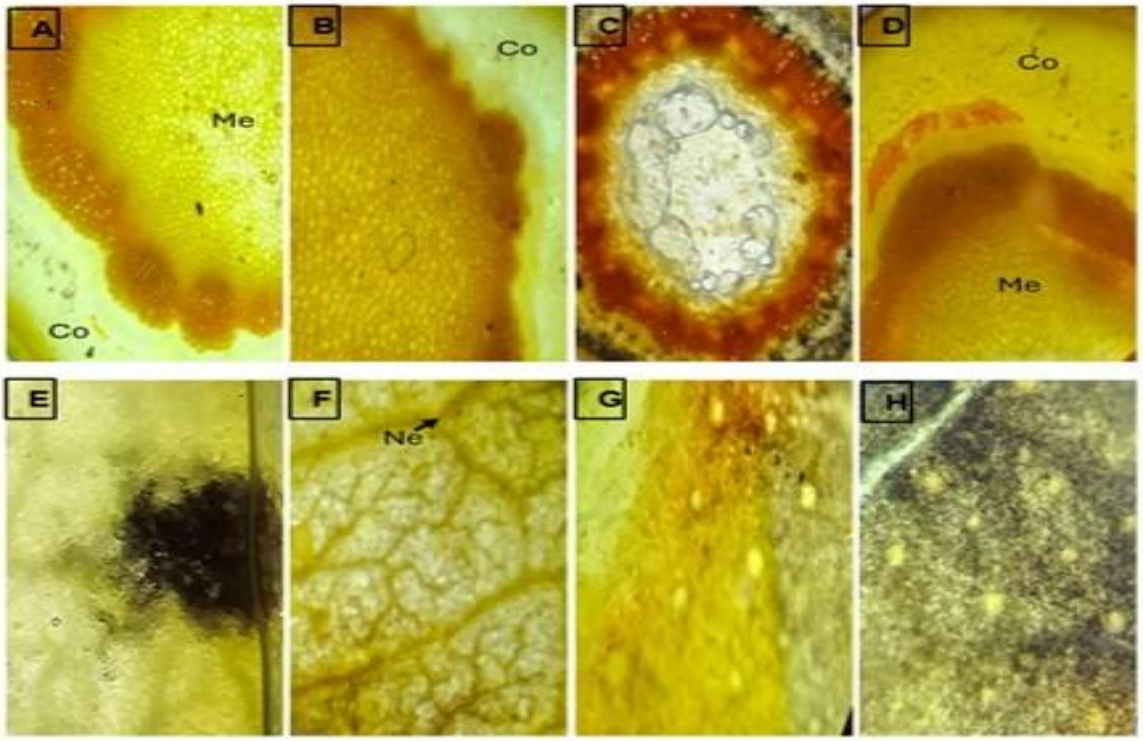


Figura 2. Cortes transversales del tallo (A-D) y vista superficial de las hojas (E-H) de *Ruta chalepensis* provenientes de diferentes tratamientos con luces LED, LED azul (B, F), LED roja (C, G), LED azul+roja (D, H). Tinción con reactivo de Wagner. Aumentos a 10X (A-D) y 40X (E-H). Co: córtex, Me: médula, Ne: nervadura.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que el solvente metanólico permitió detectar alcaloides en todos los tratamientos con luz LED, mientras que en las pruebas histoquímicas se observó la presencia de estos compuestos tanto en hojas y tallos de plantas expuestas a luz LED. Los hallazgos sugieren que la exposición a luces LED de diferente longitud de onda favorece la producción de alcaloides en *Ruta chalepensis*, reforzando su capacidad defensiva.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Amoozgar, A. Mohammadi, M. R. Sabzalian, “Impact of light emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. grizzly”, Photosynthetica. Vol. 55, 2017: 85–95. DOI: 10.1007/S11099-016-0216-8
2. S. Bures, M. Urrestarazu, S. Kotiranta, “Iluminación artificial en agricultura”, Artículo técnico, 2018, http://www.bibliotecahorticultura.com/. Accesado: 14/05/2026.

3. E. M. Coba-Olmedo, “Elaboración de una fórmula farmacéutica con extractos de R*uta graveolens* (ruda) y C*amaemelum nobile* (manzanilla) para el tratamiento de la inflamación articular”, Tesis de Licenciatura, Riobamba-Ecuador, 2022: pp. 103.
4. T. Coimbra, S. Ferreira, A. P. Duarte, “Genus ruta: a natural source of high value products with biological and pharmacological properties,” Journal of Ethnopharmacology. Vol. 260, 2020: 113076.
5. X. A. Domínguez, "Métodos de investigación fitoquímica”, Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional (AID), SA Editorial Limusa, SA, México-Buenos Aires, 1973.
6. J. H. Elizondo-Luévano, N. E. Rodríguez-Garza, A. F. Bazaldúa-Rodríguez, et al., “Cytotoxic, Anti-Hemolytic, and Antioxidant Activities of *Ruta chalepensis* L. (Rutaceae) Extract, Fractions, and Isolated Compounds,” Plants. Vol. 12, 2023: 2203.
7. H. Fazal, B. H. Abbasi, N. Ahmad, S. S Ali, F. Akbar, F. Kanwal. “Correlation of different spectral lights with biomass accumulation and production of antioxidant secondary metabolites in callus cultures of medicinally important *Prunella vulgaris* L.” J. Photochem. Photobiol. B. Vol. 159, 2016: 1–7.
8. L. Joosten, J. A. van Veen, “Defensive properties of pyrrolizidine alkaloids against Microorganisms”, Phytochem Rev. Vol. 10, 2011:127-136. DOI 10.1007/s11101-010-9204-y
9. S. J. Kim, E. J. Hahn, J. W. Heo and K. Y. Paek, “Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*”, Sci. Hortic. Vol. 101, 2004: 143–151.
10. R. W. J. Kortbeek, M. van der Gragt, P. M. Bleeker, “Endogenous plant metabolites against insects”, European Journal of Plant Pathology. Vol. 154, 2019:67–90.
11. C. Y. T. Kuo, C. H. Chen, S. H. Chen, I. H. Lu, M. J. Chu, L. C. Huang, C. Y. Lin, C. Y. Chen, H. F. Lo, S. T. Jeng and L. F. O. Chen, “The effect of red light and far-red light conditions on secondary metabolism in Agarwood”, BMC Plant Biol. Vol. 15, 2015: 139.
12. M. Miranda, A. Cuéllar, Manual de Prácticas de Laboratorio. Farmacognosia y Productos Naturales. La Habana: Editorial Félix Varela. 2001, 437 pp.
13. M. Nadeem, B. H. Abbasia, M. Younasa, W. Ahmada, A. Zahira, C. Hanob, “LED-enhanced biosynthesis of biologically active ingredients in callus cultures of *Ocimum basilicum*”, J. Photochem Photobiol. B. Vol. 190, 2019: 172–178.
14. A. Szewczyk, A. Marino, J. Molinari, H. Ekiert, and N. Miceli, “Phytochemical Characterization, and Antioxidant and Antimicrobial Properties of Agitated Cultures of Three Rue Species: *Ruta chalepensis, Ruta corsica*, and *Ruta graveolens*,” Antioxidants. Vol. 11, 2022: 592.
15. S. Zhen, M. Haidekker, M.W. van Iersel, “Far red light enhances photochemical efficiency in a wavelength dependent manner”, Physiol. Plant. Vol. 167, 2019: 21–33. doi: 10.1111/ppl.12834

EFECTO DEL TITANIO EN PARÁMETROS DE CRECIMIENTO INICIAL DE PLÁNTULAS DE CAÑA DE AZÚCAR

Víctor Hugo Carbajal-Vázquez[1]; Fernando Carlos Gómez-Merino[1]; Libia Iris Trejo-Téllez[1]; Juan Valente Hidalgo-Contreras[2]

[1]Colegio de Posgraduados Campus Montecillo. [2]Colegio de Posgraduados Campus Córdoba. carbajal.victor@colpos.mx

RESUMEN

En México, el cultivo de caña de azúcar se produce en 15 entidades federativas sobre una superficie superior a 800 mil hectáreas, lo que sostiene una cadena productiva que genera aproximadamente 500 mil empleos directos y 2.4 millones indirectos. Por ello, constituye un cultivo de gran relevancia económica para México. El titanio (Ti) es un metal de transición con potencial benéfico para los cultivos, ya que puede estimular parámetros germinativos. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del Ti aplicado a yemas de caña de azúcar de los cultivares Mex 69-290, CP 72-2086 y Mex 09-341 durante la fase de imbibición y después de la siembra, considerando variables relacionadas con el crecimiento inicial. Se utilizaron yemas de 8 a 10 cm obtenidas de tallos de los tres genotipos, las cuales se sometieron a imbibición durante 18 h en soluciones con diferentes concentraciones de Ti (0, 5 y 10 mM). Posteriormente, cada yema se estableció en macetas plásticas negras (13 × 14 × 18.5 cm) con una mezcla de turba blanca (Super Terra ST1 Hawita) y tezontle en proporción 1:1 (v/v). Tras la siembra, se aplicaron riegos de 200 mL de agua potable cada dos días. A los 10, 20, 30 y 40 días después de la siembra, se aplicaron 100 mL de cada solución con Ti directamente al sustrato. Por tanto, la aplicación de Ti se realizó tanto en la imbibición como en la etapa posterior a la siembra, con una duración de la fase experimental de 45 días. Al momento de la cosecha se determinaron unidades SPAD, área foliar (AF) y biomasa fresca de hojas (BFH). Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva. La aplicación de Ti tuvo efectos diferenciales entre genotipos. En el cv. Mex 69-290, la dosis 5 mM Ti incrementó las unidades SPAD en 15% con respecto a su testigo, pero redujo AF y BFH en 23 y 19%, respectivamente. En el cv. CP 72-2086, la dosis 10 mM Ti redujo las unidades SPAD y la BFH en 39 y 26% en comparación con el testigo. En AF, la dosis 5 mM Ti superó al testigo en 14%. En el genotipo Mex 09-341, la dosis 10 mM Ti redujo unidades SPAD, AF y BFH en 10, 15 y 14%, respectivamente, en comparación con su testigo. Se concluye que el Ti tiene efectos diferenciales en el crecimiento inicial de plántulas de caña dependiendo del genotipo, destacando respuestas positivas en los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086.

INTRODUCCIÓN

En México, el cultivo de caña de azúcar se produce en 15 entidades federativas, sobre una superficie superior a 800 mil hectáreas, lo que sostiene una cadena productiva que genera aproximadamente 500 mil empleos directos y 2.4 millones indirectos. Por ello, constituye un cultivo de gran relevancia económica para México (Gómez-Merino *et al*., 2021). En el periodo de zafra de 2013, se obtuvo una producción de caña de azúcar en verde de 59 011 397 Mg en una superficie industrializada de 780 254 ha, en tanto que, en el periodo de zafra de 2025, la producción de caña en verde fue de 43 524 749 Mg en una superficie de 736 486 ha; esto significa que en 12 años ha habido una reducción de producción de caña de 26% y que la superficie utilizada disminuyó 43,768 ha (DOF, 2026). Esta reducción tanto de producción como de superficie cultivada se puede atribuir a varios factores, entre ellos los efectos del cambio climático y el crecimiento poblacional. Debido a lo anterior, es necesaria la adopción de los principios de la agricultura sostenible (sistema de producción que busca la seguridad alimentaria y satisfacer necesidades sin comprometer los recursos naturales) en el cultivo

de caña de azúcar. Dentro de este concepto destaca el uso de bioestimulantes, los cuales constituyen una alternativa sostenible para mejorar la calidad y rendimiento de los cultivos.

Los bioestimulantes representan una estrategia innovadora para regular procesos fisiológicos en las plantas, favoreciendo el crecimiento, reduciendo los efectos del estrés y aumentando el rendimiento agrícola. Su uso contribuye al desarrollo de sistemas productivos más eficientes y sostenibles. La bioestimulación se basa en sustancias orgánicas e inorgánicas, extractos vegetales y microorganismos benéficos que actúan como catalizadores metabólicos, mejorando la absorción de agua y nutrientes, además de activar mecanismos de defensa contra el estrés oxidativo y factores abióticos extremos (Yakhin, *et al*., 2017; Ruzzi *et a*l., 2024). De acuerdo con du Jardin (2015), existen siete categorías de bioestimulantes dentro de los que destacan los elementos benéficos como aluminio (Al), cerio (Ce), cobalto (Co), yodo (I), sodio (Na), lantano (La), selenio (Se), silicio (Si), titanio (Ti) y vanadio (V). De estos, el Ti es un metal de transición con potencial benéfico para los cultivos, ya que puede estimular parámetros germinativos, mejorar los procesos fotosintéticos y estimular la actividad enzimática en plantas superiores (Lyu *et al*., 2017; Carbajal-Vázquez *et al*., 2025).

TEORÍA

La bioestimulación con los llamados elementos benéficos, aunque no esenciales para las plantas, favorece el crecimiento y la calidad de los cultivos cuando estos se aplican en bajas concentraciones. Además, estimulan mecanismos de resistencia y tolerancia frente a factores de estrés biológico, químico y físico en condiciones ambientales adversas (Trejo-Téllez *et al*., 2023).

El Ti como bioestimulante, mejora parámetros fisiológicos (longitud de raíz, tallo y planta completa, peso fresco y seco, y número de hojas) y bioquímicos (pigmentos fotosintéticos) (Mustafa *et al*., 2021), así como, mejora la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD), glutatión reductasa (GR) y ascorbato peroxidasa (APX) importantes en los sistemas de defensa antioxidante (Hu *et al*., 2020; Khalid *et al*., 2024). Con base en lo anterior, el objetivo fue evaluar el efecto del Ti aplicado a yemas de caña de azúcar de los cultivares Mex 69-290, CP 72-2086 y Mex 09-341 durante la fase de imbibición y después de la siembra, considerando variables relacionadas con el crecimiento inicial.

PARTE EXPERIMENTAL

El material vegetal utilizado se obtuvo de las parcelas experimentales del Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, ubicado en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México (18° 86' N, 96° 85 O, a una altitud de 650 m). Se utilizaron tallos de tres genotipos: dos comerciales Mex 69-290 y CP 72-2086, y un híbrido en fase semicomercial Mex 09-431. A los tallos obtenidos se les realizaron cortes de entre 8 y 10 cm para separar las yemas, las cuales se sometieron a imbibición durante 18 h en soluciones con diferentes concentraciones de Ti: 0, 5 y 10 mM. Posteriormente, cada yema se estableció en macetas plásticas negras (13 × 14 × 18.5 cm) con una mezcla de turba blanca (Super Terra ST1, Hawita) y tezontle en proporción 1:1 (v/v). Tras la siembra, se aplicaron riegos de 200 mL de agua potable cada dos días. A los 10, 20, 30 y 40 días después de la siembra, se aplicaron 100 mL de cada solución con Ti directamente al sustrato. Por tanto, la aplicación de Ti se realizó tanto en la imbibición como en la etapa posterior a la siembra, con una duración de la fase experimental de 45 días. Todo el proceso experimental se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel con cobertura plástica y malla antiáfido en los laterales. Al momento de la cosecha, se determinaron unidades SPAD utilizando un medidor portátil SPAD-502® (Minolta, Tokio, Japón); el área foliar (AF) con un integrador de AF (LI-CORLI-3000A; Lincoln, NE, Estados Unidos); y la biomasa fresca de hojas (BFH) con una balanza analítica (Adventurer Ohaus Pro AV213C; Parsippany, NJ, Estados Unidos). Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva.

RESULTADOS

La aplicación de Ti tuvo efectos diferenciales entre genotipos. En el cv. Mex 69-290, la dosis 5 mM Ti incrementó las unidades SPAD en 15% con respecto a su testigo, pero redujo AF y BFH en 23 y 19%, respectivamente. En tanto que, en la BFH se observó un ligero incremento de 1.4% con la dosis con 10 mM Ti, con respecto al testigo. Sin embargo, esta misma dosis redujo las unidades SPAD en un 15% y el AF en 11%, en ambos casos con respecto al testigo (**Cuadro 1**).
En el cv. CP 72-2086, la dosis de 5 mM Ti incremento el AF en un 14%, con respecto al testigo. Por otro lado, la dosis 10 mM Ti redujo las unidades SPAD, el AF y la BFH en 39, 17 y 26%, respectivamente, en comparación con el testigo (**Cuadro 1**). En el híbrido Mex 09-341, la dosis con 5 mM disminuyo el AF y la BFH en 10 y 6%, respectivamente, en comparación con el testigo. Asimismo, la dosis 10 mM Ti redujo unidades SPAD, AF y BFH en 10, 15 y 14%, respectivamente, en comparación con su testigo (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Respuestas de tres genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.), tratadas con distintas dosis de titanio (Ti) en variables morfológicas de crecimiento.

Cultivares e híbrido	Ti (mM)	Unidades SPAD	Área Foliar (cm^2)	Biomasa Fresca de Hojas (g)
Mex 69-290	**0**	33.5±2.5	107.9±16.2	7.3±1.1
Mex 69-290	**5**	38.5±3.0	83.4±5.5	5.9±0.3
Mex 69-290	**10**	28.5±4.5	96.0±35.8	7.4±2.4
CP 72-2086	**0**	34.8±2.5	105.6±22.1	8.2±1.1
CP 72-2086	**5**	34.7±1.0	120.7±9.4	8.1±0.5
CP 72-2086	**10**	21.3±1.6	87.9±6.1	6.1±0.4
Mex 09-341	**0**	36.7±2.0	112.8±23.7	8.0±1.2
Mex 09-341	**5**	36.5±2.2	101.9±19.4	7.5±1.0
Mex 09-341	**10**	32.9±4.2	96.2.9±38.2	6.9±2.7

mM = milimolar.

CONCLUSIONES

La aplicación de Ti mostró respuestas diferenciadas según el genotipo y la dosis evaluada. En general, la dosis de 5 mM presentó efectos favorables en algunas variables fisiológicas y de crecimiento, particularmente en los cultivares Mex 69-290 y CP 72-2086, donde se observaron incrementos en las unidades SPAD y el área foliar, respectivamente. Sin embargo, también ocasionó reducciones en la biomasa fresca de hoja y el área foliar. Por otro lado, se observó una tendencia de la dosis con 10 mM Ti a generar efectos negativos más consistentes, disminuyendo las unidades SPAD, el área foliar y la biomasa fresca de hoja en la mayoría de los genotipos evaluados. Estos resultados indican que la respuesta al Ti depende tanto de la concentración aplicada como del genotipo, sugiriendo que dosis moderadas podrían estimular ciertos parámetros fisiológicos, mientras que, concentraciones elevadas pueden provocar efectos adversos sobre el crecimiento vegetal.

BIBLIOGRAFÍA

1. DOF, “Diario Oficial de la Federación: Programa Nacional de la Agroindustria de la caña de azúcar 2026-2030”. Consultado en línea el 25 de mayo de 2026: de https://sidof.segob.gob.mx/notas/5787689

2. F. C. Gómez-Merino, L. I. Trejo-Téllez, N. Aguilar-Rivera, “Agregación de valor y diversificación de la agroindustria de la caña de Azúcar en México: Opciones y desafíos”, ATAM, Vol. 34, 2, 2021, pp. 6-10.
3. J. Hu, X. Wu, F. Wu, W. Chen, J. C. White, Y. Yang, B. Wang, B. Xing, T. Shu, X. Wang, “Potential application of titanium dioxide nanoparticles to improve the nutritional quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.)”. J. Hazardous Mater., Vol. 389, 2020, 121837.
4. L. I. Trejo-Téllez, L. F. Gómez-Trejo, F. C. Gómez-Merino, “Biostimulant effects and concentration patterns of beneficial elements in plants. *In*: *Beneficial chemical elements of plants: Recent developments and future prospects*, S. Padey, D. K. Tripathi, V. P. Singh, S. Sharma, D. K. Chauhan, John Wiley & Sons, LTD, 2023, pp. 58-102. Hoboken, NJ, Estados Unidos.
5. M. F. Khalid, M. Z. Jawaid, M. Nawaz, R. A. Shakoor, T. Ahmed, “Employing titanium dioxide nanoparticles as biostimulant against salinity: Improving antioxidative defense and reactive oxygen species balancing in eggplant seedlings”, Antioxidants, Vol. 13, 10, 2024, 1209.
6. M. Ruzzi, G. Colla, Y. Rouphael, “Biostimulants in agriculture II: Towards a sustainable future”, Front. Plant Sci., Vol. 15, 2024, pp. 1427-283
7. N. Mustafa, N. I. Raja, N. Ilyas, M. Ikram, Z. U. R. Mashwani, M. Ehsan, “Foliar applications of plant-based titanium dioxide nanoparticles to improve agronomic and physiological attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under salinity stress”. Green Process. Synth., Vol. 10, 1, 2021, 246-257.
8. O. I. Yakhin, A. A. Lubyanov, I. A. Yakhin, P. H. Brown, “Biostimulants in plant science: a global perspective”, Front. Plant Sci., Vol. 7, 2017, 2049.
9. P. du Jardin, “Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hortic., Vol. 196, 2015, pp. 3-14.
10. S. Lyu, X. Wei, J. Chen, C. Wang, X. Wang, D. Pan, “Titanium as a beneficial element for crop production. Front. Plant Sci., Vol. 8, 2017, 597.
11. V. H. Carbajal-Vázquez, L. I. Trejo-Téllez, J. L. Mejía-Méndez, J. Salinas-Ruiz, F. C. Gómez-Merino, F. C. “Biostimulant effects of titanium dioxide nanoparticles on germination and initial growth of tomato: evidence of hormesis”, PeerJ, Vol. 13, 2025, e20516.

LIBERACIÓN DE BIOPÉPTIDOS DERIVADOS DE LA SEMILLA DE CHÍA MEDIANTE DIGESTIÓN GASTROINTESTINAL SIMULADA Y EVALUACIÓN DE SU ACTIVIDAD EN RATONES CON DIABETES TIPO 2 INDUCIDA

Aaron Montes-Acevedo[1], Raúl Reyes-Bautista[1*], Martín Barajas-Segoviano[1], Luis Ángel Xoca-Orozco[1] y Julio César Almanza-Pérez[2]

[1]Tecnológico Nacional de México/ITS de Purísima del Rincón. [2]Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Iztapalapa.

*raul.rb@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

La semilla de chía (*Salvia hispanica* L.) representa una fuente prometedora de proteínas con potencial para generar péptidos bioactivos asociados al control de enfermedades metabólicas. El objetivo de este estudio fue evaluar la liberación de biopéptidos mediante digestión gastrointestinal simulada y determinar su efecto sobre la glucemia en un modelo murino de diabetes tipo 2 inducida por estreptozotocina. Las proteínas se extrajeron de harina de chía desgrasada y sin mucilago, las cuales se sometieron a hidrólisis secuencial con pepsina y pancreatina, los hidrolizados de chía fueron administrados en animales diabéticos, a los cuales se les evaluó el efecto sobre la glicemia mediante la prueba oral de tolerancia a la glucosa (POTG). El hidrolizado obtenido presentó un grado de hidrólisis de 82.23 ± 4.91 % y una fracción peptídica (<1 kDa) de correspondiente al 72.85 ± 3.82 %, en peso del hidrolizado. En la POGT, los animales tratados con el hidrolizado mostraron una reducción significativa ($p \leq 0.05$) de la respuesta glucémica, comparable a la observada con sitagliptina. Estos resultados evidencian que las proteínas de chía constituyen una fuente potencial de biopéptidos con actividad antihiperglucémica y aplicaciones en el desarrollo de alimentos funcionales.

INTRODUCCIÓN

La semilla de chía (*Salvia hispanica* L.) se ha convertido en un ingrediente de interés para el desarrollo de alimentos funcionales debido a su alto valor nutricional y a la presencia de compuestos bioactivos. Además de su reconocido perfil lipídico, posee una fracción proteínica superior a la de muchos cereales de consumo habitual y un perfil equilibrado de aminoácidos, incluyendo la mayoría de los aminoácidos esenciales [1]. Las proteínas predominantes en la chía son las globulinas y las albúminas, cuyas propiedades estructurales y fisicoquímicas influyen en su susceptibilidad a la hidrólisis enzimática y en su funcionalidad. Estas características son relevantes porque la estructura proteínica puede contener secuencias peptídicas con actividad biológica potencial [2].

La diabetes mellitus tipo 2 representa uno de los principales desafíos de salud pública a nivel mundial debido a su alta prevalencia y a las complicaciones metabólicas asociadas, lo que ha impulsado la búsqueda de compuestos bioactivos de origen natural con potencial terapéutico. En este contexto, la semilla de chía destaca por su elevado contenido proteínico y por la posible generación de péptidos bioactivos durante la digestión [3]. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la liberación de biopéptidos derivados de una digestión gastrointestinal (DGI) simulada aplicada a las fracciones proteínicas de la semilla de chía y determinar su efecto sobre la glucemia en un modelo murino con diabetes tipo 2 inducida.

TEORÍA

Las proteínas de las semillas de chía constituyen una fuente prometedora de péptidos bioactivos con potencial aplicación en la promoción de la salud. Existe evidencia actual sobre su obtención y funcionalidad, integrando predicciones *in silico* con estudios experimentales *in vitro* e *in vivo*. Los

péptidos bioactivos derivados de esta semilla destacan por su actividad inhibitoria sobre enzimas responsables del control de glucosa y presión arterial las cuales son la DPP-IV y la ECA, respectivamente, así como funcionalidades tales como la actividad antioxidante y otros efectos cardiometabólicos. Actualmente existe la necesidad de diferenciar entre la bioactividad teórica y los efectos fisiológicos demostrados, considerando factores como estabilidad, digestibilidad y biodisponibilidad. En conjunto, la valorización de las proteínas de chía respalda su uso potencial en el desarrollo de alimentos funcionales y estrategias de nutrición sostenible orientadas a la prevención de enfermedades crónicas [4].

En la chía, diversos estudios han reportado la producción de hidrolizados de proteínas y la identificación de péptidos con propiedades antioxidantes y antihipertensivas [5].

La evidencia actual sugiere que los péptidos derivados de la chía pueden presentar actividades antioxidantes, antihipertensivas, antibacterianas e inhibidoras de enzimas. Sin embargo, la mayoría de los datos disponibles provienen de ensayos *in vitro*, y la confirmación en condiciones fisiológicas sigue siendo limitada. Por lo tanto, si bien las proteínas de la chía representan fuentes prometedoras de secuencias peptídicas multifuncionales, su relevancia clínica requiere una mayor validación mediante enfoques integrados *in silico*, *in vitro* e *in vivo*.

Las semillas, como las de chía, contienen una cantidad significativa de proteínas que pueden hidrolizarse para generar péptidos y fracciones bioactivas. Sin embargo, existe una falta de información al respecto, como la evaluación detallada de las fracciones peptídicas específicas de la chía y sus efectos *in vivo* sobre el metabolismo de la glucosa y el estrés oxidativo.

La digestión gastrointestinal desempeña un papel fundamental en la liberación de péptidos bioactivos a partir de proteínas alimentarias. Durante este proceso, la acción secuencial de enzimas gástricas (pepsina) e intestinales (tripsina, quimotripsina y carbopeptidasas A y B, entre otras) genera fragmentos peptídicos capaces de interactuar con diferentes blancos moleculares relacionados con el metabolismo de la glucosa. Entre ellos, destacan los péptidos con capacidad inhibitoria sobre la dipeptidil peptidasa-IV (DPP-IV), enzima responsable de la degradación de las hormonas incretinas GLP-1 y GIP, las cuales estimulan la secreción de insulina y contribuyen al mantenimiento de la homeostasis glucémica. Diversos análisis de proteínas de chía han identificado secuencias peptídicas con potencial actividad inhibitoria sobre DPP-IV y otras enzimas relacionadas con enfermedades metabólicas, lo que sugiere que los hidrolizados obtenidos mediante digestión gastrointestinal podrían ejercer efectos antihiperglucémicos y constituir ingredientes funcionales de interés para la prevención y el manejo de la diabetes tipo 2 [2].

PARTE EXPERIMENTAL

Las semillas de chía se prepararon siguiendo la metodología descrita por Grancieri et al. [6], con algunas modificaciones. Inicialmente, las semillas se sumergieron en agua destilada (1:10, g) durante 1 h para favorecer la formación de mucílago y posteriormente se liofilizaron (Labconco Freeze Dryer 4.5; Kansas, MO, EE. UU.). El mucílago se retiró manualmente utilizando un tamiz de 250 µm (malla 60). Las semillas sin mucilago se molieron mediante un molino IKA A-10 Basic y se tamizaron nuevamente (250 µm, malla 60). Posteriormente, la harina obtenida se desgrasó con hexano (1:10, g) a 60 °C durante 2 h bajo agitación constante. La mezcla se centrifugó a 6000 × g durante 15 min a 4 °C y la harina resultante se dejó secar durante la noche bajo una campana de extracción, para después almacenarse a 4 °C hasta su utilización.

Para la extracción proteínica, se añadió agua desionizada tanto al mucílago como a la harina desgrasada de chía en una proporción de 1:20 (g). El pH de las suspensiones se ajustó a 8.0 (NaOH, 0.015 M) y las mezclas se mantuvieron bajo agitación constante a 35 °C durante 1 h. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 5000 × g durante 15 min a 25 °C. Los sobrenadantes obtenidos se recuperaron, se liofilizaron y se almacenaron a −20 °C hasta su posterior análisis.

La concentración de proteínas solubles se determinó mediante el método de Bradford [7]. Las muestras reaccionaron con el reactivo de Bradford y la absorbancia se midió a 595 nm. La cuantificación se realizó utilizando una curva de calibración elaborada con albúmina de suero bovino (BSA) como estándar.

La digestión gastrointestinal simulada del aislado proteínico de chía se realizó siguiendo la metodología descrita por Orsini Delgado et al. [8]. Inicialmente, las muestras se sometieron a hidrólisis gástrica con pepsina a pH 2.0 y 37 °C, utilizando relaciones pepsina/proteína de 1:20 y 1:10 (g/g) durante 60 y 90 min. Posteriormente, el pH se ajustó a 6.0 y se efectuó la hidrólisis intestinal con pancreatina a 37 °C, empleando relaciones pancreatina/proteína de 1:100 y 1:10 (g/g) durante 30 y 60 min. Se incluyeron controles sin adición de enzimas. La actividad enzimática se detuvo mediante calentamiento a 95 °C durante 5 min. Finalmente, los hidrolizados obtenidos se liofilizaron y almacenaron a −20 °C hasta su posterior utilización.

El grado de hidrólisis (GH) se determinó mediante el método de ácido trinitrobencenosulfónico (TNBS) descrito por Adler-Nissen [9], cuantificando los grupos amino libres generados durante la hidrólisis y midiendo la absorbancia a 340 nm. El porcentaje de GH se calculó como la relación entre los enlaces peptídicos hidrolizados (h) y el número total de enlaces peptídicos de la proteína nativa (h_{tot}), expresado como $\%GH = (h/h_{tot}) \times 100$. Los valores de h y h_{tot} se determinaron utilizando una curva patrón de L-leucina, mientras que h_{tot} se obtuvo mediante hidrólisis ácida completa con HCl 6 N a 120 °C durante 24 h.

Se utilizaron ratones machos CD1 (20–40 g, 8 semanas de edad) mantenidos bajo condiciones estándar de bioterio. La diabetes experimental se indujo mediante la administración intraperitoneal de estreptozotocina (STZ, 2 × 40 mg/kg), de acuerdo con la metodología de Ventura-Sobrevilla et al. [10], confirmándose por hiperglucemia (≥200 mg/dL) dos semanas después del tratamiento. El efecto antihiperglucémico de los hidrolizados proteínicos se evaluó mediante una prueba oral de tolerancia a la glucosa (2 g/kg) en ratones diabéticos distribuidos en grupos experimentales (n = 5), incluyendo un control negativo, un control positivo tratado con sitagliptina (580 mg/kg) y grupos tratados con hidrolizados proteínicos (300 mg/kg). La glucemia se determinó cada 30 min durante 2 h utilizando sangre obtenida de la vena caudal [11].

RESULTADOS

Las semillas de chía presentaron un contenido de mucílago de 6.54 ± 0.58 % en base seca, mientras que la fracción proteínica recuperada mediante extracción alcalina representó el 12.11 ± 1.32 %. La digestión gastrointestinal simulada con pepsina y pancreatina produjo un grado de hidrólisis acumulado de 82.23 ± 4.91 %, evidenciando una hidrólisis extensiva de las proteínas de chía. Este comportamiento sugiere una elevada susceptibilidad de las proteínas a la acción de las enzimas gastrointestinales, favoreciendo la liberación de péptidos de bajo peso molecular. En concordancia con lo anterior, el 72.85 ± 3.82 % de los productos de hidrólisis correspondió a péptidos con peso molecular inferior a 1 kDa, fracción que ha sido asociada con una mayor biodisponibilidad y potencial bioactividad.

Los resultados de la prueba oral de tolerancia a la glucosa (POTG) en ratones con diabetes inducida por estreptozotocina se muestran en la Fig. 1. Tras la administración de la carga oral de glucosa, los animales tratados con el hidrolizado proteínico de chía presentaron una respuesta glucémica significativamente menor ($p \leq 0.05$) en comparación con el grupo control diabético. Además, el comportamiento glucémico observado fue comparable al registrado en el grupo tratado con sitagliptina, inhibidor farmacológico de la dipeptidil peptidasa-IV (DPP-IV). La reducción significativa del área bajo la curva de glucosa sugiere que los péptidos liberados durante la digestión de las proteínas de chía podrían contribuir a mejorar el control glucémico postprandial, posiblemente mediante mecanismos relacionados con la modulación de la actividad de DPP-IV y la regulación de hormonas incretinas. Estos resultados evidencian el potencial de los hidrolizados proteínicos de chía como fuente de compuestos bioactivos con actividad antihiperglucémica.

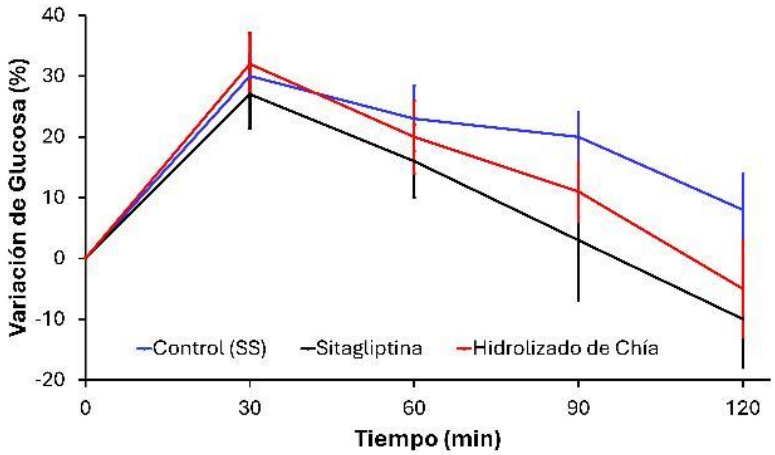


Figura 1. *POTG para la evaluación del hidrolizado de chía.*

CONCLUSIONES

La digestión gastrointestinal simulada de las proteínas de chía generó un elevado grado de hidrólisis y una alta proporción de péptidos de bajo peso molecular, asociados con una mayor biodisponibilidad y potencial bioactividad. Los hidrolizados obtenidos mostraron un efecto antihiperglucémico significativo en ratones diabéticos, comparable al de la sitagliptina, lo que respalda el potencial de las proteínas de chía como fuente de biopéptidos funcionales para el desarrollo de estrategias nutricionales dirigidas al control de la glucemia.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Morales, M. Miguel, y M. Garcés-Rimón, “Pseudocereals: a novel source of biologically active peptides”, Crit. Rev. Food Sci. Nutr., Vol. 61, 9, 2021, pp. 1537–1544.
2. M. Grancieri, H. S. D. Martino, y E. Gonzalez de Mejia, “Chia seed (*Salvia hispanica* L.) as a source of proteins and bioactive peptides with health benefits: A review”, Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., vol. 18, 2, 2019, pp. 480–499.
3. X. A. Ruiz-Armenta y M. A. Gómez-Favela, “A review of the valorization of chia (*Salvia hispanica* L.) proteins as sources of health-promoting bioactive peptides: Integrating in silico and experimental evidence”, Food and Humanity, vol. 6, 101192, 2026, p. 101192.
4. Z. Du y Y. Li, “Review and perspective on bioactive peptides: A roadmap for research, development, and future opportunities”, J. Agric. Food Res., Vol. 9, 1, 2022, pp. 100353.
5. M. Grancieri et al., “Digested protein from chia seed (*Salvia hispanica* L) prevents obesity and associated inflammation of adipose tissue in mice fed a high-fat diet”, PharmaNutrition, vol. 21, 100298, 2022, p. 100298.
6. M. Grancieri, H. S. D. Martino, y E. Gonzalez de Mejia, “Chia (*Salvia hispanica* L.) seed total protein and protein fractions digests reduce biomarkers of inflammation and atherosclerosis in macrophages in vitro”, Mol. Nutr. Food Res., vol. 63,19, 2019, p. e1900021.
7. M. M. Bradford, “A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding”, Anal. Biochem., vol. 72, 1–2, 1976, pp. 248–254.
8. M. C. Orsini Delgado, V. A. Tironi, y M. C. Añón, “Antioxidant activity of amaranth protein or their hydrolysates under simulated gastrointestinal digestion”, *Lebenson. Wiss. Technol.*, vol. 44, 8, 2011, pp. 1752–1760.
9. J. Adler-Nissen, “Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid”, J. Agric. Food Chem., vol. 27, 6, 1979 pp. 1256–1262.
10. J. Ventura-Sobrevilla et al., “Effect of varying dose and administration of streptozotocin on blood sugar in male CD1 mice”, Proc. West. Pharmacol. Soc., Vol.54, 2011, pp. 5–9.

11. A. Matsuyama-Yokono et al., “Antidiabetic effects of dipeptidyl peptidase-IV inhibitors and sulfonylureas in streptozotocin-nicotinamide-induced mildly diabetic mice”, Metabolism, Vol. 58, 3, 2009 pp. 379–386.

PROTEÍNAS DEL HONGO COMESTIBLE (*Lactarius Indigo*) COMO POTENCIAL FUENTE DE PÉPTIDOS ANTIHIPERTENSIVOS: ANÁLISIS *IN SILICO*

Stephany Alvarado-Velásquez[1], Marlenne Y. Lima-Silva[1], Orlando Arellano-Castillo[2], Armando J. Martínez[3], Elvia Cruz-Huerta[1]

[1]Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, [2]Centro de Investigaciones Biomédicas, Universidad Veracruzana, [3]Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana.
alvaradofany7113@gmail.com

RESUMEN

Los macrohongos son un componente esencial en la estabilidad de los ecosistemas forestales, sin embargo, dentro de las ciencias alimentarias su valor se ve resaltado por sus cualidades nutricionales significativas, constituyendo matrices proteicas complejas precursoras de péptidos bioactivos. Afortunadamente, México cuenta con una amplia variedad de hongos silvestres comestibles con diversos tamaños, formas y colores, destacando entre ellos por su atractivo color azul índigo intenso, el hongo *Lactarius indigo*, cuya actividad antibacteriana y citotóxica ha sido estudiada en diversos extractos acuosos pero su perfil proteico continúa siendo un tema subexplorado hasta el momento.

El presente estudio *in silico* evaluó el potencial de las proteínas del hongo azul *Lactarius indigo* como fuente de péptidos antihipertensivos, así como su estabilidad durante la simulación de digestión gastrointestinal. Las secuencias proteicas de *L. indigo* se obtuvieron de la base de datos UniProt y fueron sometidas a digestión gastrointestinal *in silico* utilizando el software Rapid Peptide Generator (Python 3) dentro de la plataforma de Google Colab. Posteriormente, la bioactividad de los péptidos obtenidos se predijo mediante el software MultiPep, mientras que su efecto toxicológico fue evaluado por el servidor ToxinPred. Finalmente, para poder garantizar que las secuencias resultantes poseen la capacidad de atravesar la barreara intestinal y ejercer su efecto identificado, se estimó la probabilidad de penetración celular (CPP) utilizando el servidor CPPpred.

Durante el proceso de digestión *in silico* se obtuvieron 55 péptidos en la fase gástrica y 136 en la fase intestinal, los cuales no presentaron toxicidad alguna. De estos péptidos, 37 (2–29 residuos) revelaron al menos una bioactividad con puntuación ≥ 0.80, predominando las actividades antihipertensiva e inhibidora de la enzima convertidora de angiotensina (ECA). Los péptidos VVR, VVRL, LAK y VK alcanzaron puntuaciones > 0.95 para actividad antihipertensiva y una probabilidad CPP ≥ 0.70, sugiriendo una alta capacidad de absorción celular. Además, estas secuencias mostraron resistencia estructural a lo largo de las fases gástrica e intestinal simuladas, indicando estabilidad metabólica *in silico*. Estos resultados sugieren que el perfil proteico de *L. indigo* podría ser una fuente viable de péptidos antihipertensivos con gran bioaccesibilidad. No obstante, es necesario realizar futuros estudios *in vitro* e *in vivo* que confirmen su bioactividad y estabilidad para poder ser implementado en matrices alimentarias con aplicaciones nutracéuticas.

INTRODUCCIÓN

La hipertensión arterial (HTA) es una de las principales causas de muerte prematura en el mundo. De acuerdo con cifras de la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) Continua 2021-2024, en México la prevalencia de HTA en personas adultas fue de 29.1%, destacando que 40.5% de quienes viven con esta condición desconocían tenerla (Campos-Nonato et al., 2025). Esta enfermedad crónica no transmisible cuya característica principal es el aumento de la presión arterial (mayor a 140/90 mmHg), representa un factor de riesgo mayor para otras enfermedades cardiovasculares, así como para la enfermedad renal crónica. Aunque existen fármacos sintéticos

como los inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ECA) ampliamente utilizados para su control, su uso prolongado se asocia con efectos secundarios adversos (OMS, 2025). Lo anterior ha propiciado la búsqueda de compuestos naturales con actividad antihipertensiva y menores efectos secundarios.

Entre estos compuestos naturales se encuentran los péptidos bioactivos. Las proteínas al hidrolizarse por acción de proteasas producen secuencias cortas de aminoácidos con funciones fisiológicas especiales conocidas como péptidos bioactivos. Estos péptidos con frecuencia son aislados de productos de origen animal (lácteos, huevo, carne, pescado) o de origen vegetal (legumbres, cereales, frutos secos). Sin embargo, investigaciones recientes muestran a los hongos comestibles como una fuente importante de péptidos bioactivos. Diversos estudios han demostrado que estos compuestos ejercen efectos antihipertensivos mediante mecanismos que incluyen la reducción del daño oxidativo celular, el aumento de la actividad de la óxido nítrico sintasa endotelial y la modulación del equilibrio entre óxido nítrico y endotelina-1, todo ello a través de la regulación del sistema renina-angiotensina (H. Li et al., 2023; W. Li et al., 2024).

Una ventaja adicional de los hongos sobre otras fuentes proteicas es su perfil de aminoácidos. A diferencia de muchas proteínas vegetales que son deficientes en uno o más aminoácidos esenciales, las proteínas de hongos generalmente presentan un perfil completo de aminoácidos esenciales, cumpliendo con los requerimientos dietarios. Además, las proteínas de hongos poseen alta estabilidad térmica y a pH, con digestibilidad que alcanza 60-80% (Yu et al., 2020). Estudios previos han demostrado que péptidos derivados de especies como *Tricholoma giganteum* (tri péptido Gly-Glu-Pro) y *Pleurotus* spp. (secuencias LPILP, IPLLP, entre otras) poseen actividad inhibitoria de ECA y efectos antihipertensivos demostrados en modelos animales (Ayimbila & Keawsompong, 2023; Cavenaghi et al., 2025).

Este amplio potencial proteico y bioactivo hace que la gran biodiversidad fúngica de México tome aún más relevancia. En el país existe una gran diversidad de hongos silvestres comestibles, encontrando a la venta especies de los géneros *Pleurotus*, *Amanita*, *Ramaria* y *Lactarius*. Entre estos destaca *Lactarius indigo* por su atractivo color azul índigo intenso. Aunque se han reportado actividades antibacteriana y citotóxica en extractos acuosos de esta especie, su perfil proteico permanece aún sin explorarse (Ochoa-Zarzosa et al., 2011; Moreno-Fuentes, 2014; Pacheco-Hernández et al., 2024). Dado que no existen estudios previos sobre el potencial antihipertensivo de las proteínas de *L. indigo*, resulta necesario realizar aproximaciones iniciales que permitan explorar y predecir esta bioactividad.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar, mediante un enfoque *in silico*, el potencial de las secuencias proteicas de *L. indigo* disponibles en UniProt como fuente de péptidos antihipertensivos, así como predecir su estabilidad durante la digestión gastrointestinal simulada, su bioactividad, su posible toxicidad y su capacidad de absorción celular. Estos resultados forman parte de las bases para futuros estudios experimentales *in vitro* e *in vivo* que sirvan para el desarrollo de productos funcionales de origen fúngico.

TEORÍA

Mecanismo de acción y biodisponibilidad de péptidos antihipertensivos

El sistema renina-angiotensina-aldosterona (SRAA) es el principal regulador de la presión arterial en el organismo. La enzima convertidora de angiotensina (ECA) es una enzima clave dentro de dicho sistema. El hígado sintetiza angiotensinógeno, el cual es fraccionado por la renina (secretada por el riñón) dando origen al decapéptido Angiotensina I (10 aminoácidos). Posteriormente, la Enzima Convertidora de Angiotensina (ECA), producida principalmente en los pulmones, interactúa con la Angiotensina I a través de su sitio activo y remueve el dipéptido terminal histidina-leucina (His-Leu), transformando la molécula en el octapéptido Angiotensina II (8 aminoácidos). Esta desencadena la vasoconstricción de los vasos sanguíneos y estimula la secreción de aldosterona en las glándulas suprarrenales, promoviendo el incremento de la presión arterial (Figura 1). Dado la importancia de

la ECA para la regulación de la presión arterial, los fármacos o nutraceúticos antihipertensivos, conocidos como Inhibidores de la ECA (IECA's), se encargan de bloquear el sitio activo de la enzima, impidiendo la formación de Angiotensina II y favoreciendo, el proceso de vasodilatación para mantener la homeostasis vascular (De Castro & Sato, 2015).

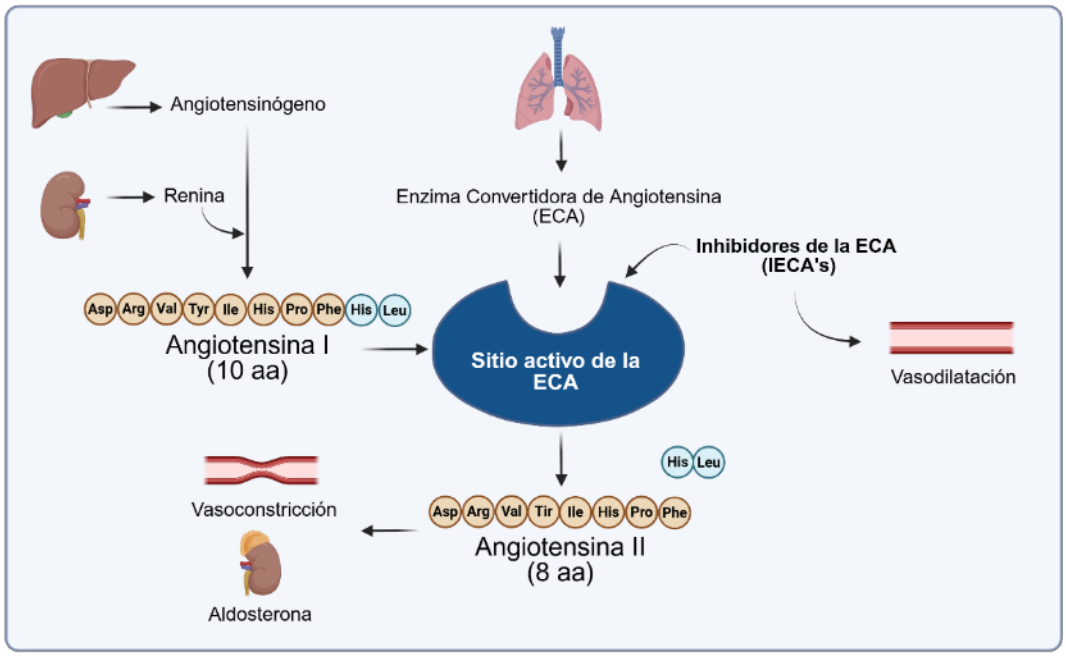


Figura 1. Esquema del Sistema Renina-Angiotensina-Aldosterona (SRAA) y el mecanismo de inhibición de la Enzima Convertidora de Angiotensina (ECA). Creado en BioRender. Alvarado Velasquez, S. (2026) https://BioRender.com/00mllwk

Comprender este mecanismo fisiológico permite plantear características estructurales que deben tener los péptidos para inhibir de forma exitosa la ECA. Estas características son: la presencia de aminoácidos hidrófobos (prolina, valina, leucina, isoleucina, fenilalanina, triptófano) en la posición C-terminal, los residuos cargados positivamente (arginina y lisina en posiciones específicas) y un peso molecular, ya que péptidos pequeños (< 3-5 kDa) presentan mayor actividad inhibitoria debido a su mejor acceso al sitio activo de la enzima (Cavenaghi et al., 2025; Hanafi et al., 2026).

Para que un péptido bioactivo pueda ejercer su efecto antihipertensivo, no basta con poseer la estructura ideal, sino que además debe resistir a procesos como la digestión gastrointestinal, ser absorbido a través del epitelio intestinal y alcanzar la circulación sistémica en forma activa. Durante su paso por el tracto digestivo las proteínas son hidrolizadas por pepsinas y enzimas pancreáticas, convirtiéndose en péptidos. Aquellos péptidos con alta capacidad CPP indican que pueden ser transportados activamente a través de las células epiteliales intestinales. Una vez absorbidos, los péptidos deben resistir la degradación por proteasas séricas para alcanzar los tejidos diana (incluyendo el endotelio vascular donde reside la ECA).

Generalidades sobre *Lactarius indigo*

Lactarius indigo (Schwein.) Fr. es un hongo basidiomiceto que pertenece a la familia Russulaceae distribuido desde América del norte hasta América Central. Este macrohongo posee un distintivo color azul índigo en todo el cuerpo fructífero, la cual se debe a la presencia de compuestos derivados del azuleno. Esta pigmentación puede variar de acuerdo a la edad o tras el daño mecánico, rasgo distintivo dentro del género *Lactarius* (Pacheco-Hernández et al., 2024; UNAM, 2021).

En México su presencia se ha documentado principalmente en estados como Veracruz, Tlaxcala, Puebla y Oaxaca. Su consumo forma parte de las tradiciones culinarias de dichas regiones, siendo apreciado por su textura y sabor que lo permiten ser utilizado en guisos, salsas o acompañamientos (Moreno-Fuentes, 2014). Estudios previos han trabajado con extractos de *L. indigo* reportando actividades antibacterianas y citotóxicas, sin embargo, en años recientes se ha evaluado su perfil metabolómico, así como su actividad antioxidante, encontrando la presencia destacable de compuestos fenólicos y actividad inhibidora de los radicales ABTS y DPPH (Ochoa-Zarzosa et al., 2011; Pacheco-Hernández et al., 2024, 2025). A pesar de estos avances, la información disponible sobre sus proteínas y su potencial para liberar péptidos antihipertensivos sigue siendo limitada.Sin embargo, otras especies del género *Lactarius* pueden contener proteínas con perfiles de aminoácidos completos, como *Lactarius deliciosus*, el cual ha mostrado actividad antimicrobiana y antioxidante relacionada a sus secuencias proteicas (Rasalanavho et al., 2020).

PARTE EXPERIMENTAL

Obtención de las secuencias proteicas

Las secuencias de proteínas de *L. indigo* fueron obtenidas a partir de la base de datos UniProtKB (Universal Protein Resource). La búsqueda se realizó utilizando las palabras “Lactarius indigo” (ID taxonómico: 457104). El conjunto de secuencias fue descargado en formato FASTA para su procesamiento. Mediante esta metodología se obtuvieron un total de 2 secuencias proteicas. La información adicional sobre cada secuencia se presenta en la Tabla 1.

ID	Nombre	Secuencia de aminoácidos
A7U593	glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (phosphorylating)	256 aa: DPRVKVLAVNDPFIDLQYMVYMFKYDSVHGRFKGTIEIKDGK LVIDGHPITVFQERDPANIQWGSVGADYVVESSGVFTTVDK ASAHL**I**GGAKKVIISAPSADAPMFVVGVNLDAYDPKYTVISNA SCTTNCLAPLAKVINDKFGIVEGLMSTIHSTTATQKTVDGPS NKDWRGGRAVNGNIIPSSTGAAKAVGKVIPALNGKLTGLSF RVPTNDVSVVDLVRLEKEATYDEIKNAVKEAADGPL
A7U595	glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (phosphorylating)	256 aa: DPRVKVLAVNDPFIDLQYMVYMFKYDSVHGRFKGTIEIKDGK LVIDGHPITVFQERDPANIQWGSVGADYVVESSGVFTTVDK ASAHL**K**GGAKKVIISAPSADAPMFVVGVNLDAYDPKYTVISN ASCTTNCLAPLAKVINDKFGIVEGLMSTIHSTTATQKTVDGPS NKDWRGGRAVNGNIIPSSTGAAKAVGKVIPALNGKLTGLSF RVPTNDVSVVDLVVRLEKEATYDEIKNAVKEAADGPL

Tabla 1. Secuencias proteicas obtenidas en UniProt para *L. indigo*.

Simulación de la digestión gastrointestinal

La digestión gastrointestinal *in silico* se realizó utilizando el software Rapid Peptide Generator (RPG), implementado en entorno Python 3 dentro de la plataforma Google Colab. El protocolo de simulación se basó en modelos estandarizados de digestión secuencial y consistió en dos fases consecutivas

- Fase Gástrica: las secuencias proteicas fueron sometidas a hidrólisis con pepsina. Se consideró la especificidad de corte en enlaces peptídicos con residuos aromáticos (fenilalanina, tirosina, triptófano) y leucina. Las condiciones de la simulación fueron: pH 2.0, temperatura de 37 °C, y un tiempo de digestión de 120 minutos.
- Fase Intestinal: Los péptidos resultantes de la fase gástrica fueron sometidos a hidrólisis secuencial con pancreatina, simulando las condiciones del duodeno. Los parámetros de esta fase fueron: pH 7.5, temperatura de 37 °C, y un tiempo de digestión de 120 minutos.

Los péptidos resultantes fueron filtrados por longitud y se eliminaron las secuencias duplicadas para su posterior análisis.

Bioactividad, toxicidad y probabilidad de penetración celular

La bioactividad de los péptidos obtenidos de la digestión simulada fue predicha utilizando la plataforma MultiPep. Este servidor integra múltiples modelos predictivos para diversas actividades biológicas: antihipertensiva (inhibición de ECA), antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria y antidiabética. Se estableció un umbral de confianza de 0.80, seleccionando aquellos péptidos que superaron este valor para al menos una actividad.

La toxicidad de los péptidos fue evaluada mediante el servidor ToxinPred, el cual clasifica las secuencias como tóxicas o no tóxicas basándose en patrones de aminoácidos asociados con los que ya son conocidos. Para determinar la capacidad de penetración celular (CPP), es decir, la probabilidad de que los péptidos identificados puedan atravesar la barrera intestinal y alcanzar su sitio de acción, se utilizó el servidor CPPpred. Este servidor emplea un algoritmo de máquina de vectores de soporte (SVM) entrenado con péptidos validad experimentalmente, asignando una probabilidad entre 0 y 1. Se consideraron con alta capacidad CPP aquellos péptidos con probabilidad ≥ 0.70.

RESULTADOS

La simulación de la digestión gastrointestinal generó 55 péptidos en la fase gástrica y 136 péptidos en la fase intestinal. El análisis de toxicidad mediante ToxinPred reveló que ninguno de los péptidos obtenidos presentó características toxicológicas, clasificándolos todos como "no tóxicos". Posteriormente, se depuró la lista de péptidos eliminando secuencias repetidas que aparecían en múltiples puntos de corte o en ambas fases de digestión. Este proceso resultó en un conjunto de 60 péptidos.

En la Figura 2 se presenta una gráfica de barras que muestra la distribución de los 60 péptidos únicos en función de su número de residuos (longitud). Como se observa, predominaron los péptidos de longitud corta, con la siguiente distribución: 25 péptidos presentaron una longitud de 2 a 4 residuos,17 péptidos presentaron una longitud de 5 a 7 residuos, 7 péptidos presentaron una longitud de 8 a 10 residuos y 11 péptidos presentaron una longitud de 11 a 29 residuos.

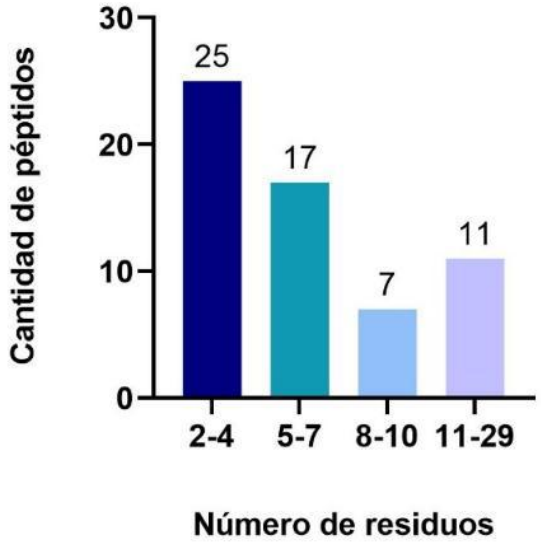


Figura 2. Distribución de los péptidos obtenidos tras digestión *in silico* de las proteínas de *L. indigo* según su longitud (número de residuos). El eje X representa los intervalos de longitud en número de residuos de aminoácidos y el eje Y representa el número de péptidos identificados en cada intervalo.

Este perfil de distribución es consistente con lo reportado en la literatura para péptidos bioactivos derivados de hongos, donde las secuencias cortas (especialmente de 2 a 10 residuos) son las más frecuentes y tienen una mayor probabilidad de presentar actividad biológica (Hanafi et al., 2026; Renjuan et al., 2022).

La distribución de los 60 péptidos según su origen en las fases de digestión simulada se representa en la Figura 3. Se identificaron dos péptidos exclusivos de la fase gástrica, lo que indica que se liberaron durante la hidrólisis con pepsina, pero fueron completamente degradados en la fase intestinal; 32 péptidos fueron exclusivos de la fase intestinal, sugiriendo que se generaron principalmente durante la hidrólisis con pancreatina; y 26 péptidos se encontraron en ambas fases (gástrica e intestinal), evidenciando una notable resistencia a la hidrólisis proteolítica completa.

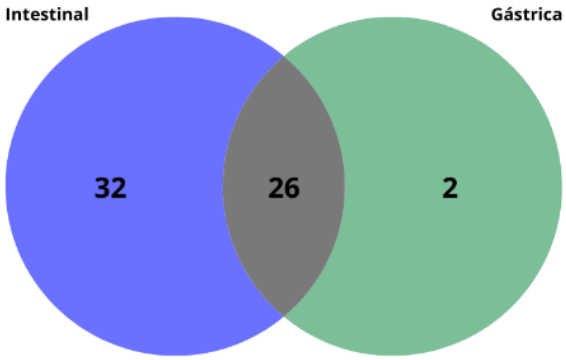


Figura 3. Diagrama de Venn de la distribución de los 60 péptidos obtenidos tras la digestión *in silico* de las proteínas de *L. indigo*.

La presencia de estos péptidos en ambas etapas de la digestión sugiere que poseen una estabilidad estructural que les permite resistir la acción secuencial de pepsina y pancreatina, una característica deseable para potenciales péptidos bioactivos que requieren alcanzar el torrente sanguíneo en su forma intacta (Hanafi et al., 2026).

De los 60 péptidos únicos obtenidos tras la digestión *in silico*, 37 péptidos (aproximadamente el 61.7%) revelaron al menos una actividad biológica con una puntuación de confianza ≥ 0.80 según el análisis con MultiPep. En la Figura 4 se presenta un diagrama de Sankey que evidencia la transición predominante de los péptidos identificados hacia las diferentes actividades biológicas predichas. Como se observa en el flujo de datos, las actividades biológicas que concentraron la mayor cantidad de péptidos fueron: actividad antihipertensiva y actividad inhibidora de la ECA.

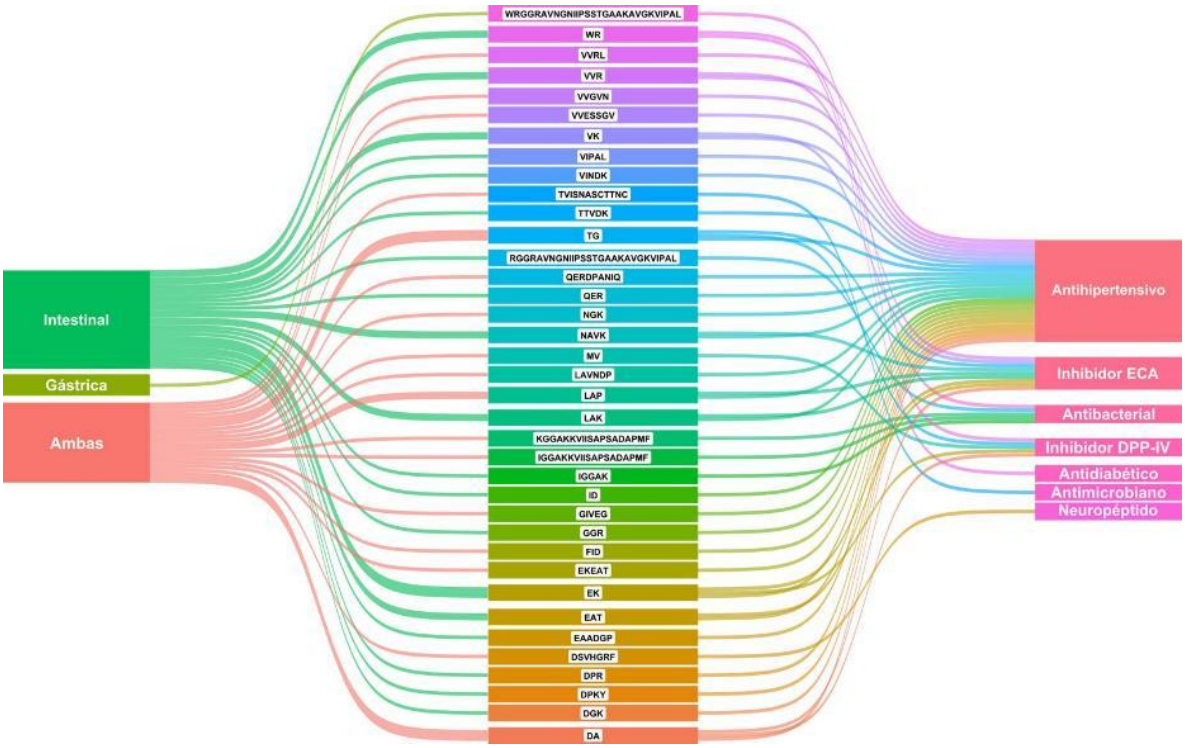


Figura 4. Diagrama de Sankey de la transición de los péptidos identificados tras la digestión *in silico* de *L. indigo* hacia las bioactividades predichas. El ancho de cada flujo es proporcional al número de péptidos que presentan dicha actividad.

Estos resultados sugieren que el perfil peptídico predicho de *L. indigo* presenta una mayor proporción de secuencias asociadas con actividad antihipertensiva e inhibición de la enzima convertidora de angiotensina (ECA), en comparación con otras bioactividades evaluadas, como actividad antioxidante, antimicrobiana, antiinflamatoria y antidiabética, las cuales mostraron menor frecuencia en el análisis bioinformático.

Entre los 37 péptidos con bioactividad predicha, cuatro secuencias destacaron por presentar las puntuaciones más altas para actividad antihipertensiva en MultiPep (> 0.95): VVR, VVRL, LAK y VK (Tabla 2). Además, estas secuencias mostraron valores de probabilidad CPP ≥ 0.70, lo que sugiere un alto potencial para atravesar el epitelio intestinal y alcanzar la circulación sistémica, donde podrían ejercer sus funciones. la absorción intestinal ni la biodisponibilidad sistémica de los péptidos.

También se analizó la presencia de estas secuencias durante las fases de digestión simulada. El péptido VVRL se identificó tanto en la fase gástrica como en la intestinal, lo que sugiere una estabilidad relativa frente a la hidrólisis secuencial con pepsina y enzimas pancreáticas. En contraste, los péptidos VVR, LAK y VK fueron identificados exclusivamente en la fase intestinal, lo que indica que podrían generarse principalmente durante la hidrólisis intestinal y permanecer como productos finales bajo las condiciones de simulación empleadas.

Secuencia	Longitud (aa)	Origen	Puntuación Multipep	Bioactividad
VVRL	4	Ambas	0.98	Antihipertensivo
VVR	3	Intestinal	1.00	Antihipertensivo
LAK	3	Intestinal	0.99	Antihipertensivo
VK	2	Intestinal	1.00	Antihipertensivo

Tabla 2. Péptidos de *L. indigo* seleccionados tras la digestión gastrointestinal *in silico*. Se muestra la secuencia de aminoácidos, la longitud en número de residuos (aa), el origen según la fase de digestión simulada (gástrica, intestinal o ambas) y la puntuación de bioactividad predicha por MultiPep (escala 0-1).

Estos resultados son consistentes con lo reportado por De Carvalho et al. (2025) en hidrolizados proteicos de *Pleurotus spp*., donde se indicó que la presencia de aminoácidos hidrofóbicos, como Leu, Ala, Val, Gly, Ile, Pro, Met, Phe y Trp, puede contribuir de manera relevante a la bioactividad de los péptidos liberados tras la hidrólisis enzimática. En particular, los autores destacaron que residuos como prolina (Pro) y leucina (Leu), especialmente cuando se localizan en regiones terminales de las secuencias peptídicas, pueden favorecer interacciones hidrofóbicas asociadas con su actividad biológica. En el presente estudio, los péptidos VVRL (Val-Val-Arg-Leu) y LAK (Leu-Ala-Lys) contienen residuos hidrofóbicos, como valina y leucina, así como aminoácidos básicos, como arginina o lisina, características estructurales que han sido asociadas con péptidos inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina (ECA).

Por otra parte, Manoharan et al. (2017) identificaron el tripéptido Gly-Val-Arg (GVR) en extractos de *Pleurotus pulmonarius* y reportaron actividad inhibitoria de ECA, con un valor de IC_{50} de 55 µg/mL. En el mismo estudio, el tripéptido VVR (Val-Val-Arg) también fue evaluado dentro del cribado in silico y mostró actividad inhibitoria de ECA en el ensayo in vitro, con un IC_{50} de 93 µg/mL. La similitud estructural entre GVR y VVR, caracterizada por la presencia de arginina en la región C-terminal y residuos hidrofóbicos en la región N-terminal, lo que sugiere que el mecanismo de inhibición de VVR podría ser también de tipo competitivo, uniéndose al sitio activo de la ECA y compitiendo con el angiotensinógeno.

CONCLUSIONES

A pesar de mostrar de los resultados predictivos, es importante reconocer que cualquier aproximación *in silico*, aunque esté respaldada por herramientas validadas como MultiPep, CPPpred y ToxinPred, requiere confirmación experimental mediante ensayos *in vitro* que determinen los valores reales de concentración inhibitoria media (IC_{50}) de los péptidos, así como estudios *in vivo* en modelos animales, como ratas espontáneamente hipertensas, que permitan evaluar el efecto antihipertensivo en un organismo completo.

En conclusión, el presente estudio in silico sugiere que las secuencias proteicas de *L. indigo* disponibles en UniProt pueden liberar péptidos cortos con actividad antihipertensiva e inhibidora de la ECA predicha. Entre ellos, VVR, VVRL, LAK y VK destacaron como candidatos prioritarios debido a sus altas puntuaciones de bioactividad, su posible capacidad de penetración celular y su estabilidad relativa durante la digestión gastrointestinal simulada. Estos resultados sientan una base preliminar para considerar a *L. indigo* como una fuente potencial de péptidos bioactivos de interés para el desarrollo futuro de ingredientes funcionales de origen fúngico. Sin embargo, su posible aplicación en la prevención o el manejo complementario de la hipertensión arterial requiere validación experimental.

Asimismo, sería relevante explorar la posible interacción o sinergia entre los péptidos identificados y otros compuestos bioactivos presentes en la matriz fúngica, con el fin de comprender mejor su contribución al potencial funcional de esta especie y avanzar hacia su aplicación biotecnológica y nutracéutica, acorde con el aprovechamiento sostenible de la diversidad fúngica de México.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Bateman, M. J. Martin, S. Orchard, M. Magrane, A. Adesina, S. Ahmad, E. H. Bowler-Barnete, H. Bye-A-Jee, D. Carpentier, P. Denny, J. Fan, P. Garmiri, L. J. D. C. Gonzales, A. Hussein, A. Ignatchenko, G. Insana, R. Ishtiaq, V. Joshi, J. Zhang (2025). UniProt: The Universal Protein

Knowledgebase in 2025. Nucleic Acids Research, 53(D1), D609-D617. https://doi.org/10.1093/nar/gkae1010
2. A. G. B. Grønning, T.Kacprowski, C. Schéele (2021). MultiPep: a hierarchical deep learning approach for multi-label classification of peptide bioactivities. Biol Methods Protoc.: 6(1). https://doi.org/10.1093/biomethods/bpab021
3. T. Holton, G Pollastri, D. Shields, C. Mooney (2013). CPPpred: prediction of cell penetrating peptides. Bioinformatics: 29 (23); 3094–3096, https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt518
4. N. Maillet (2019) Rapid Peptides Generator: fast and efficient *in silico* protein digestion. NAR Genom Bioinform: 2(1). https://doi.org/10.1093/nargab/lqz004
5. F. Ayimbila & S. Keawsompong. (2023). Nutritional Quality and Biological Application of Mushroom Protein as a Novel Protein Alternative. Current Nutrition Reports, 12(2), 290-307. https://doi.org/10.1007/s13668-023-00468-x
6. I. Campos-Nonato, E. Monterrubio-Flores, D. Ramírez-Villalobos, M. A. Arias-Mendoza, E. Gómez-Álvarez, L. Alcocer-Díaz-Barreiro, A. Basto-Abreu, A. Reyes-García, C. Medina-García, L. Hernández-Barrera & S. Barquera (2025). Hipertensión arterial en adultos y brechas de atención a nivel nacional y estatal, Ensanut 2021-2024. Salud Pública de México, 67(6 (nov-dic)), 633-643. https://doi.org/10.21149/17102
7. D. F. L. De Carvalho Cavenaghi, W. M. D. Barros & R. J. S. De Castro (2025). Antihypertensive peptides from hydrolyzed proteins of Pleurotus spp.: Production, in vitro digestion and identification. Process Biochemistry, 149, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.11.027
8. R. J. S. De Castro & H. H. Sato (2015). Biologically active peptides: Processes for their generation, purification and identification and applications as natural additives in the food and pharmaceutical industries. Food Research International, 74, 185-198. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.013
9. M. A. Hanafi, N. Mohamad Asri, S. M. Auwal, F. H. Brishti & N. Saari (2026). Edible mushroom proteins for future foods: Integrative insights into nutrition, technofunctionality, extraction, and safety. Food Research International, 227, 118158. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.118158
10. H. Li, J. Gao, F. Zhao, X. Liu & B. Ma (2023). Bioactive Peptides from Edible Mushrooms—The Preparation, Mechanisms, Structure—Activity Relationships and Prospects. Foods, 12(15), 2935. https://doi.org/10.3390/foods12152935
11. W. Li, W. Chen, D. Wu, Z. Zhang, P. Liu, Z. Li & Y. Yang (2024). Mechanistic insights into antihypertensive activity of mushroom-derived protein-peptides via metabolomic and proteomic approaches. International Journal of Biological Macromolecules, 283, 137189. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137189
12. S. Manoharan, A. S. Shuib, N. Abdullah, S. B. Mohamad, & N. Aminudin (2017). Characterisation of novel angiotensin-I-converting enzyme inhibitory tripeptide, Gly-Val-Arg derived from mycelium of Pleurotus pulmonarius. Process Biochemistry, 62, 215-222. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.07.020
13. A. Moreno-Fuentes (2014). Un recurso alimentario de los grupos originarios y mestizos de méxico: Los hongos silvestres. Anales de Antropología, 48(1), 241-272. https://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70496-5
14. A. Ochoa-Zarzosa, Ma. S. Vázquez-Garcidueñas, V. A. Robinson-Fuentes, & G. Vázquez-Marrufo (2011). Antibacterial and cytotoxic activity from basidiocarp extracts of the edible mushroom Lactarius indigo (Schw.) Fr. (Russulaceae). African Journal of Pharmacy and Pharmacology, 5(2), 281-288. https://doi.org/10.5897/AJPP10.032
15. OMS. (2025). Hipertensión. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/hypertension
16. Y. Pacheco-Hernández, E. Lozoya-Gloria, C. Mosso-González, J. L. Varela-Caselis, & N. Villa-Ruano (2024). Insights into the Chemistry and Functional Properties of Edible Mushrooms Cropped in the Northeastern Highlands of Puebla, Mexico. Applied Sciences, 14(6), 2520. https://doi.org/10.3390/app14062520
17. Y. Pacheco-Hernández., E. Lozoya-Gloria, M. Rangel-Galván, C. Mosso-González, & N Villa-Ruano (2025). Functional Properties of the Hydroethanolic Extracts and Main Phenolics of Lactarius indigo and Amanita jacksonii: Millenary Mushrooms Consumed in the Northeastern Highlands of Puebla, Mexico. Chemistry & Biodiversity, 22(12), e02316. https://doi.org/10.1002/cbdv.202502316

18. Y. Pacheco-Hernández, N. Villa-Ruano, E. Lozoya-Gloria, E. De Jesús Terán-Sánchez & E. Becerra-Martínez (2024). Revealing the1 H-NMR Profiling of Six Edible Mushrooms Consumed in the Northeastern Highlands of Puebla, Mexico. Chemistry & Biodiversity, 21(6), e202301851. https://doi.org/10.1002/cbdv.202301851
19. M. Rasalanavho, R. Moodley, & S. B. Jonnalagadda (2020). Elemental bioaccumulation and nutritional value of five species of wild growing mushrooms from South Africa. Food Chemistry, 319, 126596. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126596
20. L. Renjuan., Z. Xiuli, S. Liping, & Z. Yongliang (2022). Identification, in silico screening, and molecular docking of novel ACE inhibitory peptides isolated from the edible symbiot Boletus griseus-Hypomyces chrysospermus. LWT, 169, 114008. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114008
21. UNAM. (2021). Hongos Comestibles de México [Hongos Comestibles y Tóxicos de México]. Hongos de México. https://hongoscomestiblesytoxicos.ib.unam.mx/fichas/Lactarius_indigo.html
22. Q. Yu,, M. Guo, B. Zhang, H. Wu, Y. Zhang, & L. Zhang (2020). Analysis of Nutritional Composition in 23 Kinds of Edible Fungi. Journal of Food Quality, 2020, 1-9. https://doi.org/10.1155/2020/8821315

CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE *Microbacterium Maritypicum* CON RELEVANCIA AMBIENTAL

Berenice Noriega Luna, Lluvia Gema Belén Vázquez Cisneros, Brenda Isabel Chía Landín, Blanca Paulina Yebra Olmos, Julissa Alexandra Espinoza Chamorro y Aranza Esmeralda Franco José

Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@ugto.mx

RESUMEN

Los microorganismos ambientales constituyen una fuente importante de diversidad metabólica con potencial aplicación en procesos de biorremediación, agricultura sostenible y biotecnología industrial. Entre ellos, las bacterias del género *Microbacterium* han despertado interés debido a su capacidad para colonizar diversos ambientes y participar en procesos de transformación de compuestos orgánicos complejos. En este trabajo se realizó la caracterización funcional de una cepa de *Microbacterium maritypicum* aislada de la Presa de la Soledad, Guanajuato, México, con el objetivo de explorar sus capacidades metabólicas y su posible relevancia ambiental. La caracterización incluyó la evaluación de propiedades asociadas con aplicaciones biotecnológicas y ambientales, tales como producción de biosurfactantes mediante los ensayos drop-collapse y emulsificación (E24), actividades enzimáticas hidrolíticas (amilasa, celulasa, proteasa y lipasa), solubilización de fosfato, producción de ácido indolacético, actividad antimicrobiana por difusión en agar y crecimiento en presencia de naftaleno como hidrocarburo aromático modelo. Los resultados preliminares obtenidos evidenciaron la capacidad de la cepa para producir biosurfactantes y desarrollar diversas actividades metabólicas relacionadas con la degradación de compuestos complejos y la movilización de nutrientes. Asimismo, se observó crecimiento en presencia de naftaleno, sugiriendo tolerancia a compuestos hidrofóbicos y potencial adaptación a ambientes impactados por contaminantes orgánicos. Las actividades evaluadas reflejan una notable versatilidad metabólica y sugieren posibles aplicaciones en procesos de biorremediación y aprovechamiento biotecnológico. Este estudio contribuye al conocimiento de la diversidad funcional de microorganismos presentes en ecosistemas acuáticos continentales de México y proporciona información inicial sobre el potencial ambiental de *Microbacterium maritypicum*, destacando la importancia de continuar explorando recursos microbianos nativos para el desarrollo de tecnologías sostenibles.

INTRODUCCIÓN

La creciente contaminación de los ecosistemas por compuestos orgánicos persistentes, hidrocarburos, residuos agroindustriales y otros contaminantes emergentes representa uno de los principales desafíos ambientales del siglo XXI. La acumulación de estos compuestos puede alterar los ciclos biogeoquímicos, afectar la biodiversidad y comprometer la calidad del agua y del suelo, generando impactos ecológicos y socioeconómicos significativos (Brusseau et al., 2019). Aunque diversos métodos físicos y químicos han sido utilizados para el tratamiento de contaminantes, muchos de ellos presentan limitaciones asociadas a elevados costos operativos, generación de subproductos secundarios o baja eficiencia frente a mezclas complejas de contaminantes (Azubuike et al., 2016; Sharma et al., 2022). En este contexto, la biotecnología ambiental ha adquirido un papel cada vez más relevante al ofrecer alternativas sostenibles basadas en el aprovechamiento de organismos capaces de transformar, inmovilizar o degradar compuestos de interés ambiental, contribuyendo al desarrollo de estrategias más eficientes y compatibles con los principios de la economía circular (Kour et al., 2021; Sharma et al., 2022).

Los microorganismos desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas debido a su participación en los ciclos biogeoquímicos y a su extraordinaria capacidad para

adaptarse a condiciones ambientales diversas. Su amplia diversidad metabólica les permite utilizar una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos como fuentes de carbono, energía y nutrientes favoreciendo procesos de transformación, detoxificación y reciclaje de nutrientes. Estas características han despertado un creciente interés en la exploración de microorganismos ambientales como fuentes de enzimas, biosurfactantes, metabolitos bioactivos y otras moléculas de interés biotecnológico. En particular, numerosas bacterias han demostrado capacidades para degradar contaminantes orgánicos, promover el crecimiento vegetal, solubilizar nutrientes y producir compuestos con actividad antimicrobiana, lo que las convierte en herramientas prometedoras para aplicaciones en biorremediación, agricultura sostenible y desarrollo industrial (Kour et al., 2021; Bala et al., 2022; Wackett, 2022).

Entre las capacidades metabólicas que han despertado mayor interés biotecnológico destacan la producción de biosurfactantes, las actividades enzimáticas extracelulares y la síntesis de metabolitos capaces de favorecer la disponibilidad de nutrientes o inhibir el crecimiento de microorganismos competidores. Los biosurfactantes son compuestos anfifílicos que incrementan la biodisponibilidad de contaminantes hidrofóbicos y facilitan su degradación microbiana, por lo que han sido ampliamente estudiados en procesos de biorremediación de hidrocarburos y otros contaminantes orgánicos persistentes. De manera complementaria, enzimas hidrolíticas como amilasas, celulasas, proteasas y lipasas participan en la degradación de macromoléculas complejas presentes en diversos ambientes naturales y contaminados. Asimismo, algunas bacterias poseen la capacidad de solubilizar fosfatos minerales, producir fitohormonas como el ácido indolacético (AIA) y sintetizar compuestos con actividad antimicrobiana, características que contribuyen tanto al mantenimiento de la funcionalidad de los ecosistemas como al desarrollo de aplicaciones biotecnológicas y agrícolas. La identificación de microorganismos que integren varias de estas funciones representa una estrategia prometedora para el diseño de soluciones sostenibles orientadas a la restauración ambiental y el aprovechamiento de recursos biológicos (Banat et al., 2010; Kour et al., 2021; Sharma et al., 2022).

Dentro de los microorganismos con potencial biotecnológico, las bacterias pertenecientes al género *Microbacterium* han recibido creciente atención debido a su amplia distribución en ambientes terrestres, acuáticos y asociados a organismos vivos (Takeuchi & Hatano, 1998; Gneiding et al., 2008). Este género, perteneciente al filo Actinomycetota, se caracteriza por su capacidad de adaptarse a condiciones ambientales diversas y por presentar una notable versatilidad metabólica. Diversas especies de *Microbacterium* han sido asociadas con la degradación de contaminantes orgánicos, la transformación de compuestos aromáticos, la producción de enzimas extracelulares y la promoción del crecimiento vegetal, lo que evidencia su potencial para aplicaciones ambientales y agrícolas (Madhaiyan et al., 2010; Eida et al., 2020). Sin embargo, a pesar del creciente interés en este grupo bacteriano, muchas de sus especies permanecen escasamente caracterizadas desde el punto de vista funcional. En particular, *Microbacterium maritypicum* ha sido poco estudiada en comparación con otras especies del género, por lo que existe información limitada sobre sus capacidades metabólicas, su papel ecológico y sus posibles aplicaciones biotecnológicas. Esta falta de conocimiento resalta la importancia de realizar estudios dirigidos a la caracterización funcional de cepas ambientales pertenecientes a esta especie.

Los ecosistemas acuáticos continentales albergan comunidades microbianas altamente diversas que desempeñan funciones esenciales en los ciclos biogeoquímicos y en la transformación de compuestos orgánicos presentes en el ambiente (Newton et al., 2011). La exploración de estos microorganismos representa una estrategia valiosa para identificar nuevos recursos biológicos con potencial aplicación en procesos de biorremediación, agricultura sostenible y biotecnología ambiental (Wackett, 2022; Bala et al., 2022). En México, numerosos cuerpos de agua han sido escasamente estudiados desde una perspectiva microbiológica, por lo que aún existe un amplio potencial para el descubrimiento de microorganismos con capacidades metabólicas de interés. La Presa de la Soledad, ubicada en el estado de Guanajuato, representa un ecosistema acuático de interés para la exploración de recursos microbianos nativos y sus posibles aplicaciones ambientales. En este contexto, la cepa B3A de *Microbacterium maritypicum*, registrada en la base de datos BioSample del National Center for Biotechnology Information (NCBI; SAMN46967012), fue seleccionada para

evaluar distintas propiedades funcionales asociadas con aplicaciones ambientales. Su estudio contribuye al conocimiento de la biodiversidad microbiana nativa y proporciona información relevante sobre el potencial biotecnológico de microorganismos aislados de ecosistemas acuáticos mexicanos. Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar funcionalmente una cepa ambiental de *Microbacterium maritypicum* (B3A) aislada de la Presa de la Soledad, Guanajuato, México, mediante la evaluación de propiedades funcionales relacionadas con la producción de biosurfactantes, actividades enzimáticas hidrolíticas, solubilización de fosfato, producción de ácido indolacético, actividad antimicrobiana y crecimiento en presencia de hidrocarburos aromáticos. La información generada contribuirá al conocimiento de las capacidades metabólicas de esta especie y permitirá identificar su potencial para futuras aplicaciones en procesos de biorremediación y aprovechamiento sostenible de recursos microbianos.

TEORÍA

Los biosurfactantes son compuestos tensioactivos producidos por diversos microorganismos, incluyendo bacterias, levaduras y hongos, que poseen una estructura anfifílica compuesta por regiones hidrofílicas e hidrofóbicas. Esta característica les permite reducir la tensión superficial e interfacial entre líquidos inmiscibles, favoreciendo la emulsificación y dispersión de compuestos poco solubles en agua. A diferencia de los surfactantes sintéticos, los biosurfactantes suelen presentar menor toxicidad, mayor biodegradabilidad y una elevada estabilidad bajo diferentes condiciones ambientales, lo que ha impulsado su estudio en aplicaciones relacionadas con la biorremediación, la agricultura, la industria alimentaria y los procesos farmacéuticos (Banat et al., 2010; Marchant & Banat, 2012).

Además de sus propiedades tensioactivas, los biosurfactantes desempeñan un papel importante en la biodisponibilidad de contaminantes hidrofóbicos presentes en el ambiente. Muchos hidrocarburos y compuestos aromáticos poseen una baja solubilidad en agua, lo que limita su acceso por parte de los microorganismos y reduce la eficiencia de los procesos de biodegradación. La producción de biosurfactantes favorece la emulsificación y movilización de estos compuestos, incrementando el área de contacto entre el contaminante y las células microbianas. Como consecuencia, diversos estudios han reportado una mejora en la degradación de hidrocarburos derivados del petróleo y otros contaminantes orgánicos persistentes cuando participan microorganismos productores de biosurfactantes. Debido a estas características, la detección de actividad biosurfactante constituye un criterio de interés para identificar microorganismos con potencial aplicación en procesos de biorremediación de ambientes contaminados por compuestos hidrofóbicos (Mnif & Ghribi, 2015; Varjani & Upasani, 2017).

Las enzimas hidrolíticas producidas por microorganismos constituyen una de las herramientas biológicas más importantes para la degradación y transformación de materia orgánica en los ecosistemas. Estas biomoléculas catalizan la ruptura de enlaces químicos mediante reacciones de hidrólisis, permitiendo la conversión de polímeros complejos en compuestos de menor peso molecular que pueden ser utilizados como fuentes de carbono, energía y nutrientes por las comunidades microbianas. Debido a su elevada especificidad catalítica, eficiencia y capacidad de actuar bajo condiciones ambientales diversas, las enzimas microbianas han adquirido gran relevancia en sectores como la industria alimentaria, farmacéutica, agrícola, energética y ambiental. Asimismo, desempeñan un papel fundamental en procesos de biodegradación y reciclaje de nutrientes, contribuyendo al mantenimiento de la funcionalidad de los ecosistemas y al desarrollo de estrategias sostenibles para el tratamiento de residuos y contaminantes (Gurung et al., 2013; Singh et al., 2016).

Entre las enzimas hidrolíticas de mayor interés ambiental y biotecnológico se encuentran las amilasas, celulasas, proteasas y lipasas. Las amilasas participan en la degradación de polisacáridos como el almidón, mientras que las celulasas intervienen en la hidrólisis de la celulosa, uno de los biopolímeros más abundantes de la biosfera. Por su parte, las proteasas catalizan la degradación de proteínas en péptidos y aminoácidos, contribuyendo al reciclaje de nitrógeno en los ecosistemas, mientras que las lipasas actúan sobre lípidos y compuestos grasos, favoreciendo su transformación

y aprovechamiento biológico. La producción de estas enzimas por microorganismos ambientales refleja su capacidad para utilizar diversos sustratos orgánicos y adaptarse a condiciones ecológicas cambiantes. Debido a ello, la detección de actividades hidrolíticas constituye un indicador útil para evaluar el potencial metabólico de cepas microbianas con posibles aplicaciones en procesos de biodegradación, tratamiento de residuos orgánicos y producción de bioproductos de interés industrial (Gurung et al., 2013; Sarmah et al., 2018).

Además de su participación en procesos de degradación y transformación de compuestos orgánicos, numerosos microorganismos ambientales contribuyen al crecimiento y desarrollo vegetal mediante mecanismos que favorecen la disponibilidad de nutrientes y la producción de compuestos bioactivos. Entre estas actividades destacan la solubilización de fosfato y la producción de fitohormonas, características ampliamente asociadas con las denominadas bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR). Estas bacterias desempeñan un papel importante en la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y agrícolas al mejorar la nutrición mineral de las plantas, estimular el crecimiento radicular y favorecer la tolerancia frente a diferentes condiciones de estrés ambiental. Debido a ello, la búsqueda de microorganismos con estas capacidades ha adquirido una creciente relevancia en el desarrollo de estrategias agrícolas más sostenibles y menos dependientes de fertilizantes químicos (Vessey, 2003; Ahemad & Kibret, 2014). El fósforo es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal; sin embargo, una fracción importante de este elemento se encuentra en formas insolubles o poco disponibles para las plantas. Diversos microorganismos poseen la capacidad de solubilizar compuestos fosfatados mediante la producción de ácidos orgánicos y otros mecanismos metabólicos que incrementan su disponibilidad en el suelo. De manera complementaria, algunas bacterias sintetizan ácido indolacético (AIA), una de las principales auxinas involucradas en la regulación del crecimiento y desarrollo vegetal, favoreciendo procesos como la elongación celular, la formación de raíces laterales y la absorción de nutrientes. La combinación de estas capacidades puede contribuir significativamente al establecimiento y productividad de las plantas, por lo que la evaluación de la solubilización de fosfato y la producción de AIA constituye una herramienta útil para identificar microorganismos con potencial aplicación como biofertilizantes y agentes promotores del crecimiento vegetal (Rodríguez & Fraga, 1999; Spaepen et al., 2007; Ahemad & Kibret, 2014).

Los microorganismos habitan comunidades complejas donde compiten constantemente por espacio, nutrientes y otros recursos esenciales para su supervivencia. Como resultado de estas interacciones, numerosas bacterias han desarrollado mecanismos que les permiten inhibir el crecimiento de microorganismos competidores mediante la producción de compuestos bioactivos con actividad antimicrobiana. Estos metabolitos incluyen antibióticos, péptidos antimicrobianos, enzimas líticas y otras moléculas capaces de afectar diferentes procesos fisiológicos de bacterias, hongos y otros microorganismos. Desde una perspectiva ecológica, la producción de compuestos antimicrobianos constituye una estrategia adaptativa que favorece la colonización de nichos específicos y contribuye al equilibrio de las comunidades microbianas presentes en los ecosistemas (Hibbing et al., 2010; Granato et al., 2019).

Además de su función ecológica, los compuestos antimicrobianos producidos por microorganismos representan una fuente valiosa de moléculas con potencial aplicación en los sectores farmacéutico, agrícola y ambiental. La creciente aparición de microorganismos resistentes a los antimicrobianos convencionales ha impulsado la búsqueda de nuevos metabolitos bioactivos provenientes de microorganismos ambientales, particularmente de aquellos pertenecientes a grupos taxonómicos poco explorados. En este contexto, la evaluación de actividad antimicrobiana en cepas ambientales constituye una estrategia preliminar para identificar microorganismos capaces de producir compuestos de interés biotecnológico. Asimismo, estas capacidades pueden conferir ventajas competitivas en ambientes naturales y favorecer el establecimiento de poblaciones microbianas en ecosistemas complejos. Por ello, la caracterización de microorganismos con potencial actividad antimicrobiana continúa siendo un área de investigación relevante tanto para la comprensión de las interacciones microbianas como para el descubrimiento de nuevas moléculas bioactivas (Bérdy, 2012; Hutchings et al., 2019).

Los hidrocarburos aromáticos constituyen un grupo de contaminantes ampliamente distribuidos en el ambiente como resultado de actividades industriales, transporte de combustibles, procesos de combustión y derrames de petróleo. Debido a su estabilidad química, hidrofobicidad y potencial toxicidad, muchos de estos compuestos pueden persistir durante largos periodos en los ecosistemas acuáticos y terrestres, representando un riesgo para los organismos vivos y la calidad ambiental. Frente a esta problemática, la biodegradación microbiana ha sido reconocida como una de las alternativas más eficientes y sostenibles para la eliminación de hidrocarburos, ya que diversos microorganismos poseen rutas metabólicas capaces de transformar estos compuestos en productos menos tóxicos o incorporarlos a sus procesos de crecimiento y obtención de energía (Das & Chandran, 2011; Varjani, 2017).

Entre los hidrocarburos aromáticos, el naftaleno es frecuentemente utilizado como compuesto modelo en estudios de biodegradación debido a que representa uno de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) más simples y ampliamente distribuidos en ambientes contaminados. La capacidad de un microorganismo para crecer o mantenerse activo en presencia de naftaleno constituye un indicador preliminar de tolerancia y posible participación en procesos de transformación de compuestos aromáticos. Además, la interacción entre microorganismos, biosurfactantes y compuestos hidrofóbicos puede favorecer la biodisponibilidad de estos contaminantes y mejorar su aprovechamiento metabólico. Por ello, la evaluación del crecimiento microbiano en presencia de naftaleno es una herramienta ampliamente utilizada para identificar cepas con potencial aplicación en estrategias de biorremediación de sitios impactados por hidrocarburos y otros contaminantes orgánicos persistentes (Ghosal et al., 2016; Varjani, 2017).

PARTE EXPERIMENTAL

Sitio de estudio, aislamiento e identificación bacteriana

La cepa bacteriana utilizada en este estudio fue aislada a partir de muestras de suelo recolectadas en febrero de 2024 en la Presa de la Soledad, ubicada en el estado de Guanajuato, México. Las muestras fueron procesadas mediante técnicas microbiológicas convencionales para la obtención de cultivos puros. Para el aislamiento bacteriano se utilizó medio Tryptic Soy Agar (TSA), incubando las placas a 37 °C durante 48 h. Entre los aislamientos obtenidos, se seleccionó la cepa B3A debido a sus características de crecimiento y potencial biotecnológico preliminar. La cepa fue conservada en glicerol al 20 % a −80 °C hasta su utilización en los ensayos de caracterización funcional. La identificación taxonómica de la cepa se realizó mediante análisis basado en genoma completo utilizando la plataforma Type (Strain) Genome Server (TYGS), asignándose a la especie *Microbacterium maritypicum*. La cepa fue registrada en la base de datos BioSample del National Center for Biotechnology Information (NCBI) bajo el acceso SAMN46967012 y forma parte del BioProject PRJNA1226936 titulado *Ecological dynamics of microbial communities in metal-rich and organic soils: Case study La Soledad Dam*. Posteriormente, la cepa fue empleada para la evaluación de diferentes propiedades funcionales asociadas con aplicaciones ambientales y biotecnológicas, incluyendo producción de biosurfactantes, actividades enzimáticas hidrolíticas, solubilización de fosfato, producción de ácido indolacético, actividad antimicrobiana y crecimiento en presencia de hidrocarburos aromáticos.

Evaluación de propiedades funcionales

Con el propósito de evaluar el potencial ambiental y biotecnológico de *Microbacterium maritypicum* B3A, se realizaron diferentes ensayos microbiológicos orientados a determinar propiedades relacionadas con la degradación de compuestos complejos, la movilización de nutrientes y la producción de metabolitos de interés. Las pruebas incluyeron la evaluación de producción de biosurfactantes, actividades enzimáticas hidrolíticas, solubilización de fosfato, producción de ácido indolacético, actividad antimicrobiana y crecimiento en presencia de hidrocarburos aromáticos. Todos los ensayos se realizaron a partir de cultivos puros de la cepa previamente reactivada a partir de los stocks conservados a −80 °C.

Producción de biosurfactantes
La producción de biosurfactantes se evaluó mediante los ensayos de colapso de gota (drop-collapse) e índice de emulsificación a 24 h (E24). Estas pruebas permitieron determinar la capacidad de la cepa para producir compuestos tensioactivos capaces de reducir la tensión superficial y favorecer la interacción con compuestos hidrofóbicos.

Actividades enzimáticas hidrolíticas
La capacidad de producir enzimas extracelulares fue evaluada mediante ensayos cualitativos en medios sólidos específicos para la detección de actividades amilolítica, celulolítica, proteolítica y lipolítica. La actividad enzimática se determinó mediante la observación de halos de hidrólisis alrededor de las colonias bacterianas después del periodo de incubación correspondiente.

Solubilización de fosfato y producción de ácido indolacético
La capacidad de solubilizar fosfato inorgánico se evaluó en medio sólido selectivo, identificando la formación de halos claros alrededor del crecimiento bacteriano. Asimismo, la producción de ácido indolacético (AIA) se determinó mediante métodos colorimétricos comúnmente empleados para la detección de esta fitohormona microbiana.

Actividad antimicrobiana
La actividad antimicrobiana de la cepa se evaluó mediante ensayos de difusión en agar frente a microorganismos de prueba, registrando la presencia o ausencia de zonas de inhibición como indicador de producción de compuestos con potencial actividad antagonista.

Crecimiento en presencia de naftaleno
La tolerancia a hidrocarburos aromáticos se evaluó utilizando naftaleno como compuesto modelo. La cepa fue inoculada en medio mineral suplementado con el hidrocarburo y se monitoreó su crecimiento como indicador preliminar de adaptación a ambientes contaminados con compuestos orgánicos recalcitrantes.

La Figura 1 resume las principales etapas del proceso experimental, desde el sitio de muestreo y la observación inicial de la muestra de suelo hasta el aislamiento de *Microbacterium maritypicum* B3A y algunas de las evaluaciones preliminares realizadas para su caracterización funcional.

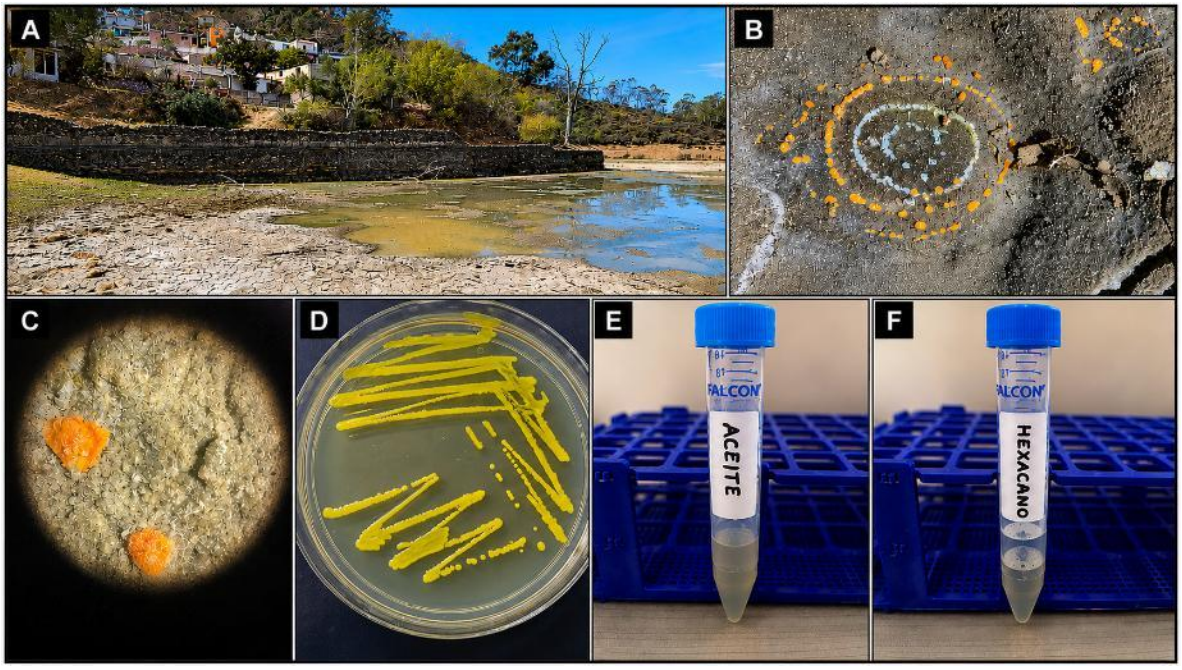


Figura 1. Aislamiento y caracterización preliminar de *Microbacterium maritypicum* B3A. (A) Sitio de muestreo localizado en la Presa de la Soledad, Guanajuato, México. (B) Punto de recolección de la muestra de suelo utilizada para el aislamiento bacteriano. (C) Observación de la muestra de suelo mediante estereoscopio. (D) Morfología colonial de la cepa B3A cultivada en medio TSA. (E) Ensayo de emulsificación utilizando aceite como sustrato. (F) Ensayo de emulsificación utilizando hexadecano como compuesto hidrofóbico. Las imágenes muestran etapas representativas del proceso de aislamiento y caracterización funcional preliminar de la cepa estudiada.

RESULTADOS

Los ensayos realizados permitieron obtener observaciones preliminares sobre las capacidades funcionales de *Microbacterium maritypicum* B3A. Aunque algunas evaluaciones continúan en proceso de análisis y validación, los resultados iniciales sugieren la presencia de características metabólicas de interés ambiental y biotecnológico, las cuales podrían estar relacionadas con procesos de degradación de compuestos orgánicos, movilización de nutrientes e interacción con otros microorganismos.

Identificación de la cepa B3A

El análisis taxonómico basado en genoma completo permitió asignar la cepa B3A a la especie *Microbacterium maritypicum*. Esta identificación proporciona un marco taxonómico para la interpretación de las propiedades funcionales evaluadas y amplía el conocimiento sobre la diversidad microbiana presente en la Presa de la Soledad. La disponibilidad de información genómica permitirá futuras investigaciones orientadas a la identificación de genes y rutas metabólicas potencialmente relacionadas con las actividades observadas. La cepa se encuentra registrada en la base de datos BioSample del NCBI bajo el acceso SAMN46967012.

Producción de biosurfactantes

Los ensayos de emulsificación mostraron la formación de emulsiones estables utilizando aceite y hexadecano como sustratos hidrofóbicos (Figura 1), sugiriendo la posible producción de compuestos con actividad tensioactiva. En las pruebas de colapso de gota y emulsificación se observaron indicios de actividad superficial, sugiriendo la posible producción de moléculas capaces de favorecer la interacción con compuestos hidrofóbicos. No obstante, se requieren evaluaciones adicionales para cuantificar y confirmar esta actividad.

Actividades enzimáticas hidrolíticas

La cepa mostró actividad hidrolítica en algunos de los sustratos evaluados, observándose formación de halos de degradación en determinadas pruebas enzimáticas, lo que sugiere la producción de enzimas extracelulares asociadas con la transformación de compuestos orgánicos complejos.

Solubilización de fosfato y producción de ácido indolacético

Las observaciones preliminares sugieren que la cepa posee características asociadas con mecanismos de promoción del crecimiento vegetal, particularmente relacionadas con la movilización de nutrientes y la producción de metabolitos de interés agronómico. No obstante, la magnitud de estas actividades continúa siendo evaluada mediante análisis complementarios.

Actividad antimicrobiana

Los ensayos de antagonismo microbiológico permitieron identificar respuestas que sugieren la posible producción de compuestos con actividad inhibitoria frente a microorganismos de prueba. Estudios posteriores permitirán confirmar la naturaleza y alcance de esta actividad.

Crecimiento en presencia de naftaleno

La cepa mostró crecimiento en presencia de naftaleno como única fuente suplementaria de hidrocarburo aromático, indicando tolerancia a este compuesto y sugiriendo una posible capacidad de adaptación a ambientes impactados por contaminantes orgánicos.

CONCLUSIONES

La caracterización funcional preliminar de *Microbacterium maritypicum* B3A permitió identificar diversas propiedades asociadas con aplicaciones ambientales y biotecnológicas. Los resultados obtenidos sugieren la capacidad de la cepa para producir biosurfactantes, desarrollar actividades hidrolíticas y crecer en presencia de compuestos aromáticos como el naftaleno, evidenciando una notable versatilidad metabólica. Asimismo, las observaciones relacionadas con solubilización de fosfato, producción de ácido indolacético y actividad antimicrobiana indican un potencial interés para futuras aplicaciones en biorremediación y promoción del crecimiento vegetal. No obstante, se requieren estudios complementarios para cuantificar estas actividades y profundizar en los mecanismos involucrados. Este trabajo contribuye al conocimiento de la diversidad funcional de microorganismos nativos de la Presa de la Soledad y destaca el potencial de *Microbacterium maritypicum* B3A como un recurso microbiano prometedor para el desarrollo de estrategias ambientales sostenibles. La disponibilidad de información genómica asociada a esta cepa constituye una base valiosa para futuras investigaciones orientadas a comprender los mecanismos moleculares responsables de las actividades observadas y a explorar su potencial aplicación en procesos de biorremediación y biotecnología ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University – Science, 26*(1), 1–20. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001
2. Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques-classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 32*(11), 180. https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x.
3. Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B. V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., & Tripathi, M. (2022). Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: A review for a green and sustainable environment. *Toxics, 10*(8), 484. https://doi.org/10.3390/toxics10080484
4. Banat, I. M., Franzetti, A., Gandolfi, I., Bestetti, G., Martinotti, M. G., Fracchia, L., Smyth, T. J., & Marchant, R. (2010). Microbial biosurfactants production, applications and future potential. *Applied Microbiology and Biotechnology, 87*(2), 427–444. https://doi.org/10.1007/s00253-010-2589-0
5. Bérdy, J. (2012). Thoughts and facts about antibiotics: Where we are now and where we are heading. *The Journal of Antibiotics, 65*(8), 385–395. https://doi.org/10.1038/ja.2012.27
6. Brusseau, M. L., Pepper, I. L., & Gerba, C. P. (2019). *Environmental and pollution science* (3rd ed.). Academic Press.
7. Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnology Research International, 2011*, 941810. https://doi.org/10.4061/2011/941810
8. Eida, A. A., Ziegler, M., Lafi, F. F., Michell, C. T., Voolstra, C. R., Hirt, H., & Saad, M. M. (2018). Desert plant bacteria reveal host influence and beneficial plant growth properties. *PLoS ONE, 13*(12), e0208223. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208223
9. Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K., & Ahn, Y. (2016). Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. *Frontiers in Microbiology, 7*, 1369. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369

10. Gneiding, K., Frodl, R., & Funke, G. (2008). Identities of *Microbacterium* spp. encountered in human clinical specimens. *Journal of Clinical Microbiology, 46*(11), 3646–3652. https://doi.org/10.1128/JCM.01202-08
11. Granato, E. T., Meiller-Legrand, T. A., & Foster, K. R. (2019). The evolution and ecology of bacterial warfare. *Current Biology, 29*(11), R521–R537. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.04.024
12. Gurung, N., Ray, S., Bose, S., & Rai, V. (2013). A broader view: Microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond. *BioMed Research International, 2013*, 329121. https://doi.org/10.1155/2013/329121
13. Hibbing, M. E., Fuqua, C., Parsek, M. R., & Peterson, S. B. (2010). Bacterial competition: Surviving and thriving in the microbial jungle. *Nature Reviews Microbiology, 8*(1), 15–25. https://doi.org/10.1038/nrmicro2259
14. Hutchings, M. I., Truman, A. W., & Wilkinson, B. (2019). Antibiotics: Past, present and future. *Current Opinion in Microbiology, 51*, 72–80. https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.10.008
15. Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Singh, M., Joshi, D., Singh, J., Suyal, D. C., Kumar, A., Rajput, V. D., Yadav, A. N., Singh, K., Singh, J., Sayyed, R. Z., Arora, N. K., & Saxena, A. K. (2021). Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: Present status and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(20), 24917–24939. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13252-7
16. Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Lee, J. S., Lee, K. C., Saravanan, V. S., & Santhanakrishnan, P. (2010). *Microbacterium azadirachtae* sp. nov., a plant-growth-promoting actinobacterium isolated from the rhizoplane of neem seedlings. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 60*(7), 1687–1692. https://doi.org/10.1099/ijs.0.015800-0
17. Marchant, R., & Banat, I. M. (2012). Microbial biosurfactants: Challenges and opportunities for future exploitation. *Trends in Biotechnology, 30*(11), 558–565. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.07.003
18. Mnif, I., & Ghribi, D. (2015). Review: Lipopeptides biosurfactants: Main classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications. *Biopolymers, 104*(3), 129–147. https://doi.org/10.1002/bip.22630
19. Newton, R. J., Jones, S. E., Eiler, A., McMahon, K. D., & Bertilsson, S. (2011). A guide to the natural history of freshwater lake bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews, 75*(1), 14–49. https://doi.org/10.1128/MMBR.00028-10
20. Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances, 17*(4–5), 319–339. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2
21. Sarmah, N., Revathi, D., Sheelu, G., Yamuna Rani, K., Sridhar, S., Mehtab, V., & Sumana, C. (2018). Recent advances on sources and industrial applications of lipases. *Biotechnology Progress, 34*(1), 5–28. https://doi.org/10.1002/btpr.2581
22. Sharma, P., Gaur, V. K., Gupta, S., Varjani, S., Pandey, A., Gnansounou, E., You, S., Ngo, H. H., Wong, J. W. C., & Tsang, D. C. W. (2022). Trends in mitigation of industrial waste: Global health hazards, environmental implications and waste derived economy for environmental sustainability. *Science of the Total Environment, 811*, 152357. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152357
23. Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2016). Microbial enzymes: Industrial progress in 21st century. *3 Biotech, 6*(2), 174. https://doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8
24. Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews, 31*(4), 425–448. https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x
25. Takeuchi, M., & Hatano, K. (1998). Union of the genera *Microbacterium* Orla-Jensen and *Aureobacterium* Collins et al. in a redefined genus *Microbacterium*. *International Journal of Systematic Bacteriology, 48*(3), 739–747. https://doi.org/10.1099/00207713-48-3-739
26. Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology, 223*, 277–286. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037
27. Varjani, S. J., & Upasani, V. N. (2017). A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants. *International Biodeterioration & Biodegradation, 120*, 71–83. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006

28. Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil, 255*(2), 571–586. https://doi.org/10.1023/A:1026037216893
29. Wackett, L. P. (2022). The future of microbial biotechnology. *Microbial Biotechnology, 15*(1), 79–80. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13920

SOLUCIÓN PRESERVANTE COMERCIAL EN LA VIDA EN FLORERO DE *Antirrhinum Majus* CV. POTOMAC CRIMSON

Nadia Issaí Torres-Flores, Yolanda Leticia Fernández-Pavía,
Libia Iris Trejo-Téllez, Fernando Carlos Gómez-Merino

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.
nadia.torres@colpos.mx

RESUMEN

La floricultura es una actividad económica que se ha consolidado como un pilar para el desarrollo local y nacional, al generar beneficios económicos significativos. El perrito o boca de dragón (*Antirrhinum majus*) es una especie de corte de temporada, ampliamente cultivada y de gran importancia económica a nivel mundial debido a su alto valor ornamental. Después de la cosecha, las flores de corte experimentan cambios fisiológicos que aceleran la senescencia y reducen su calidad comercial; por ello, el uso de soluciones preservantes representa una estrategia clave para prolongar la vida en florero. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar una solución preservante comercial (Chrysal®) en variables de crecimiento y calidad en tallos de *A. majus* cv. Potomac Crimson en poscosecha. Se establecieron las plántulas de perritos en un invernadero y a los 100 días después del trasplante se llevó a cabo la cosecha, esos tallos se trasladaron al laboratorio y se estableció el ensayo poscosecha con dos tratamientos: 1) testigo (agua destilada) y 2) solución conservante Chrysal® (10 g L^{-1}), bajo un diseño completamente al azar, con siete y cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue un tallo colocado en un recipiente con 1.5 L del tratamiento correspondiente. Las variables evaluadas al inicio (cosecha) y final del ensayo (12 días después de la cosecha, ddc) fueron: altura de planta, número de hojas, diámetro de tallo medio, lecturas SPAD, número de flores abiertas y de botones. Al momento del corte, los tallos fueron homogéneos en la mayoría de las variables; solo se observaron diferencias en el número de hojas, con cinco hojas más en el testigo. Al finalizar el ensayo, las variables altura de planta (118.2 cm), número de hojas (43) y de flores abiertas (39) fueron mayores en los tallos tratados con la solución preservante; las lecturas SPAD fueron mayores en el testigo (70.6). El diámetro de tallo medio y el número de botones no presentaron diferencias estadísticas significativas. Al término del ensayo (12 ddc), los tallos testigo se encontraron completamente marchitos, mientras que los tratados con la solución preservante mantuvieron la turgencia y apariencia comercial. Se concluye que la solución conservante Chrysal® mejora la calidad poscosecha y prolonga la vida en florero de los tallos de *Antirrhinum majus* cv. Potomac Crimson.

INTRODUCCIÓN

A nivel global, el sector florícola fue considerado inicialmente como una actividad de lujo para personas con alto nivel adquisitivo. Sin embargo, el desarrollo de la floricultura se remonta a los siglos XVIII y XIX en Europa, periodo en el que se introdujeron varias especies florales que fueron mejoradas genéticamente y que, en muchos casos, continúan cultivándose en la actualidad. Hacia 1930 se inició la producción organizada de flores de corte; no obstante, fue después de la Segunda Guerra Mundial, cuando esta actividad se consolidó como un modelo industrial de producción y se estableció un mercado formal para su comercialización (Betancourt-Espinoza *et al*., 2025).

En este contexto, la floricultura ha emergido como un pilar fundamental para el desarrollo local y nacional, al generar importantes beneficios económicos y sociales. A pesar de su crecimiento acelerado, el sector enfrenta diversos desafíos ambientales que requieren estrategias de producción más sostenibles (Casigña-Guamam *et al*., 2024).

La industria de las flores ornamentales se ha consolidado como uno de los sectores más dinámicos a nivel mundial. Con el desarrollo económico y el incremento de la demanda de productos ornamentales de alta calidad, características como el porte de la planta, el color, la fragancia, la forma y la duración de la floración adquieren una importancia creciente en la determinación de su valor comercial (Qiao *et al*., 2023).

La boca de dragón (*Antirrhinum majus* L.) es una especie originaria de la región del Mediterráneo y presenta una alta demanda en el mercado internacional (Azam *et al*., 2025). Esta planta ornamental es ampliamente apreciada por la vistosidad de sus flores y por su potencial de duración en florero (Abdullah *et al*., 2020).

Por otra parte, después de la cosecha, las flores de corte experimentan cambios fisiológicos y bioquímicos que aceleran los procesos de senescencia y reducen su calidad comercial. Además, la proliferación de microorganismos y la consecuente obstrucción vascular del tallo limitan la absorción de agua, lo que disminuye su vida útil. Debido a ello, el uso de soluciones conservantes constituye una estrategia eficaz para mantener la calidad y prolongar la vida en florero de las flores cortadas (Chen, 2024; Ansabayeva *et al*., 2025).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de una solución preservante comercial (Chrysal®) en variables de crecimiento y calidad poscosecha en tallos de *A. majus* cv. Potomac Crimson.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en condiciones de invernadero, utilizando como material vegetal plántulas de perrito (*Antirrhinum majus* L.) cultivar Potomac Crimson.

Las plántulas se trasplantaron en bolsas de polietileno negro de 30 x 30 cm con tezontle (tamaño de partícula ≤ 6 mm) como sustrato, bajo un diseño completamente al azar. A los tres días después del trasplante se inició la aplicación de la solución nutritiva de Steiner (1984) al 50%, la cual se suministró durante todo el ciclo del cultivo.

La cosecha se realizó a los 100 días después del trasplante, cuando los tallos florales alcanzaron el punto de corte comercial, definido como la apertura de flores en aproximadamente un tercio de la longitud de la inflorescencia. Los tallos se cortaron por la mañana (8:00 h) con tijeras de podar y se colocaron en una cubeta de 20 L con 4 L de agua. Posteriormente, fueron trasladados al laboratorio, donde permanecieron en reposo durante 2 h.

En el laboratorio se estableció el ensayo poscosecha con dos tratamientos: 1) testigo (agua destilada) y 2) solución conservante Chrysal® (10 g L^{-1}), bajo un diseño completamente al azar. La unidad experimental consistió en un tallo colocado en un recipiente con 1.5 L de la solución correspondiente. Las variables evaluadas al inicio (cosecha) y al final del ensayo (12 días después de la cosecha, ddc) fueron: altura de planta, número de hojas, diámetro de tallo medio, lecturas SPAD, número de flores abiertas y número de botones.

Al momento de la cosecha, los tallos fueron homogéneos para la mayoría de las variables; únicamente se detectaron diferencias en el número de hojas, con cinco hojas más en el tratamiento testigo (Figura 1).

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el software SAS versión 9.3 (SAS Institute Inc., 2011).

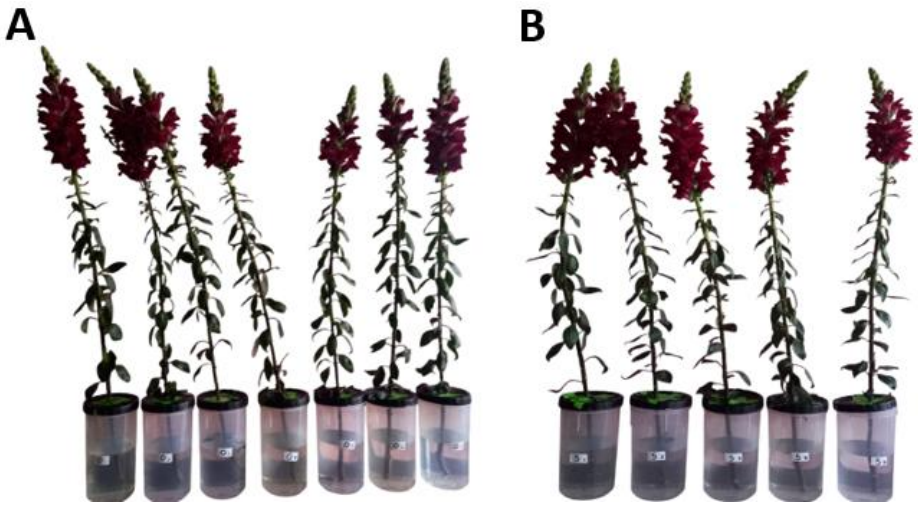


Figura 1. Tallos de perritos cultivar Potomac Crimson con longitud uniforme (~1 m) al inicio del ensayo: A) Testigo y B) Chrysal®.

RESULTADOS

Al finalizar el ensayo, los tallos tratados con la solución preservante Chrysal® presentaron valores superiores en varias de las variables evaluadas (Figura 2).

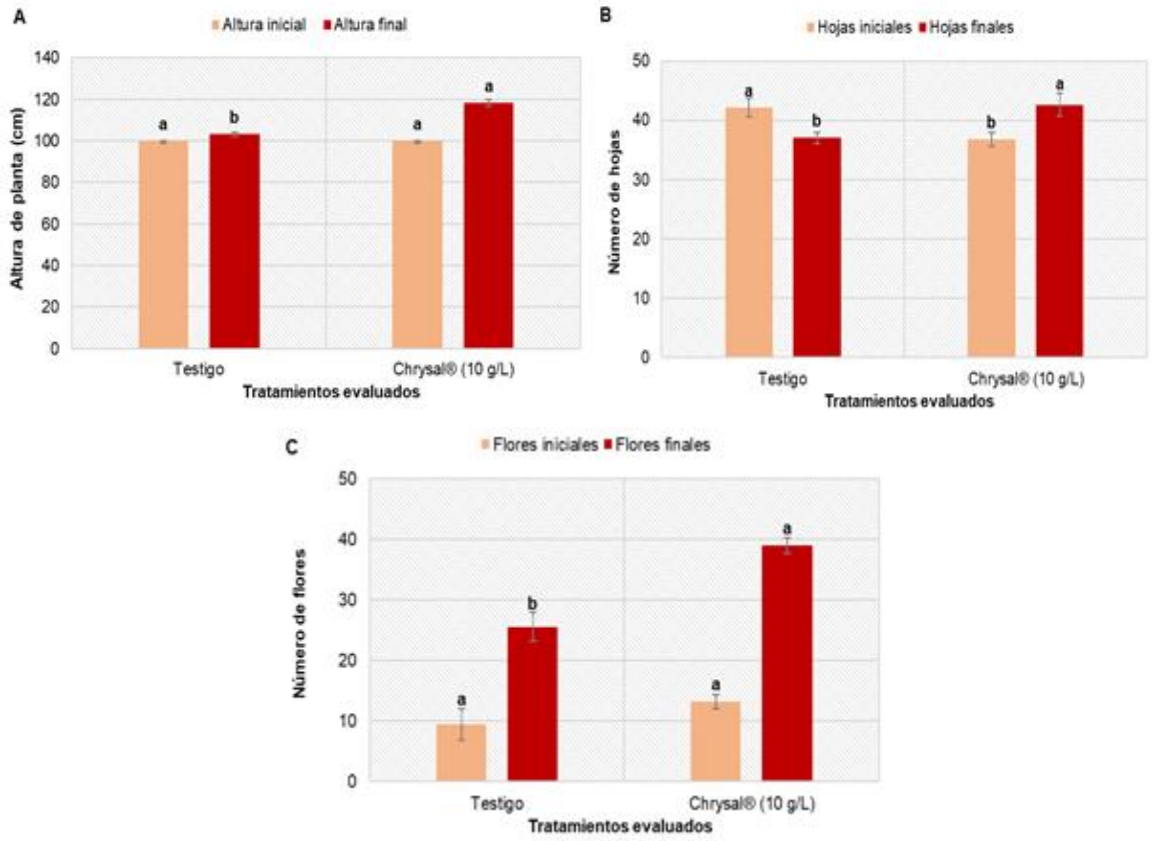


Figura 2. Efecto de la solución preservante Chrysal® en la altura de planta (A), número de hojas (B) y número de flores abiertas (C) en tallos de *Antirrhinum majus* cv. Potomac Crimson al final del ensayo. Los datos representan medias ± DE. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $P \leq 0.05$).

La altura de planta alcanzó 118.2 cm, lo que representó un incremento de 14.6% respecto al testigo (Figura 2A). De igual manera, el número de hojas aumento 15.1% (43 hojas) (Figura 2B), mientras que el número de flores abiertas fue 52.3% mayor (39 flores) en comparación con el tratamiento testigo (Figura 2C). En contraste, las lecturas SPAD fueron mayores en el testigo (70.6) con una diferencia de 8.4% respecto a los tallos tratados con Chrysal®.

El diámetro medio del tallo y el número de botones florales no mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Sin embargo, al término del ensayo (12 ddc), los tallos del tratamiento testigo se encontraron completamente marchitos, mientras que aquellos tratados con la solución preservante mantuvieron su turgencia y apariencia comercial (Figura 3). Estos resultados coinciden con lo reportado por Rabiza *et al.* (2020), quienes observaron que la aplicación del conservante comercial Chrysal® prolongó la vida en florero de los cultivares de peonía 'Königin Wilhelmina' y 'Ursynów' en dos días adicionales respecto al tratamiento testigo.

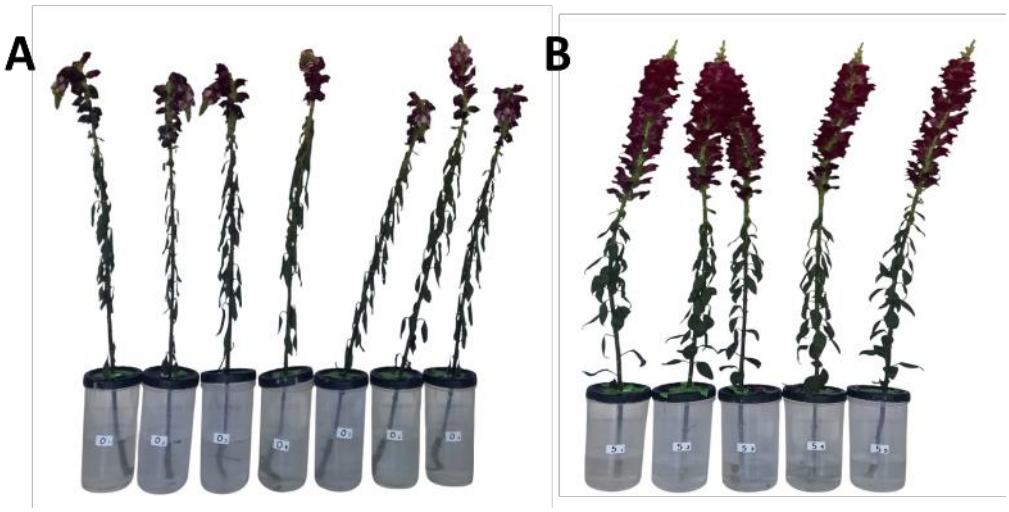


Figura 3. Tallos de *Antirrhinum majus* cv Potomac Crimson al final del ensayo, mostrando el efecto de la solución preservante en la calidad comercial: A) testigo y B) Chrysal®.

CONCLUSIONES

La solución conservante Chrysal® favoreció la calidad poscosecha de los tallos de *Antirrhinum majus* cv. Potomac Crimson al incrementar la altura de planta, el número de hojas y el número de flores abiertas, además de mantener la turgencia y la apariencia comercial durante 12 días después de la cosecha. Estos resultados indican que su aplicación retrasa los procesos de senescencia y contribuye a prolongar la vida en florero, por lo que representa una alternativa viable para mejorar la calidad comercial de esta especie de corte.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Ansabayeva, M. Makhambetov, N. Y. Rebouh, M. Abdelkader, H. S. Saudy, K. M. Hassan, M. A. Nasser, M. A. A. Ali, M. Ebrahim, "Plant growth-promoting microbes for resilient farming systems: Mitigating environmental stressors and boosting crops productivity—A review", Hortic., Vol. 11, 3, 260, 2025.

2. A. Betancourt-Espinoza, S. N. Tuz-Gia, V. E. Salcedo-Muñoz, “Sector florícola: Contribución al desarrollo socioeconómico del Ecuador, 2015–2024”, GADE. Rev. Cient., Vol. 5, 1, 2025, pp. 755-778.
3. A. Steiner, “The universal nutrient solution”, in ISOSC Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands, 1984, pp. 633-649.
4. B. Abdullah, I. Ahmad, J. M. Dole, “Optimal sowing time and planting density for selected field grown cut *Antirrhinum* and *Matthiola*”, Sci. Hortic., Vol. 261, 108909, 2020.
5. M. Azam, R. M. Ammar, S. Zaib, A. Ahmed, S. M. Asim, H. M. Anwar, H. S. Tul-Ain, M. Tariq, Karishma, M. Rashid, A. K. Masood, “Effect of different organic amendments on the growth of *Antirrhinum majus* L.”, Front. Chem. Sci., Vol. 6, 1, 2025, pp. 14-25.
6. N. S Casigña-Guamam, M. A. Cali-Palacios, E. R. Chicaiza-Reisancho, L. A. Fiallos-Ulloa, J.H. Uvidia-Armijo, “Flores y Suelo: Un estudio ambiental sobre las actividades florícolas en Los Ilinizas, Cotopaxi”, Cienc. Lat., Vol. 8, 1, 2024.
7. S. Chen, “Review of recent advances in chemical preservatives for cut flowers”, Br. J. Biol. Stud., Vol. 4, 2, 2024, pp. 01-08.
8. S. J. Rabiza, E. Skutnik, A. Jedrzejuk, A. Łukaszewska, “Postharvest treatments improve quality of cut peony flowers”, Agronomy, Vol. 10, 10, 1583, 2020.
9. SAS Institute Inc., “SAS/STAT Users Guide”. Version 9.3. SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA. 2011.
10. Z. Qiao, X. Song, Y. Kong, S. Shil, B. Yan, M. Egea-Cortines, L. Chen, “Molecular mechanisms regulating ornamental traits and scent production in snapdragon (*Antirrhinum majus* L.)”, Hortic. Adv., Vol. 1, 15, 2023.

SÍNTESIS VERDE DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA PARA LA MITIGACIÓN DE PATÓGENOS BACTERIANOS EN LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Ruiz-Aguilar Graciela M.L.[1], Lovanh Nanh[2], Camarena Martínez Saraí[1],
Nuñez Palenius Héctor G.[1], Alejo López Sergio J.[3],

[1] Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida, [2]Investigador independiente,
[3] Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Agroindustrial.
gracielar@ugto.mx.

RESUMEN

La resistencia antimicrobiana constituye un desafío global que demanda el desarrollo de estrategias alternativas a los antibióticos convencionales, particularmente en sistemas agropecuarios donde la presión selectiva favorece la emergencia de cepas resistentes. En este estudio se evaluó la síntesis verde de nanopartículas de plata empleando extracto acuoso de *Momordica charantia* L. como agente reductor y estabilizante, así como su eficacia antibacteriana frente a *Escherichia coli* ATCC 25922 como modelo de patógeno agrícola. El extracto vegetal se obtuvo por calentamiento controlado del fruto fresco en agua nanopura, seguido de filtración. La síntesis de nanopartículas se optimizó mediante la variación sistemática de pH (3–10), concentración de $AgNO_3$ (0.1–1.0 mM en etapas preliminares y 2 mM en condiciones finales), volumen de extracto y tiempo de reacción. Las condiciones óptimas correspondieron a pH 9 y 2 mM de nitrato de plata. La formación de AgNPs se confirmó por espectroscopía UV-Vis, con máximos de absorción entre 420–450 nm atribuibles a la resonancia de plasmones superficiales. El análisis FTIR evidenció la participación de grupos funcionales –OH, –NH y C–O, asociados a compuestos fenólicos, proteínas y ácidos carboxílicos presentes en el extracto. La caracterización morfológica mediante microscopía electrónica mostró nanopartículas predominantemente esféricas y algunas estructuras alargadas, con tamaños entre ~10 y 70 nm y naturaleza cristalina corroborada por difracción. La actividad antibacteriana se determinó cuantitativamente mediante conteo de unidades formadoras de colonia en caldo nutritivo, evaluando reducción logarítmica y porcentaje de inactivación a diferentes concentraciones y tiempos de exposición. Las AgNPs sintetizadas mostraron mayor eficacia que los iones Ag^+ aislados. Mientras que concentraciones mayores o iguales a 6 mM de Ag^+ fueron necesarias para lograr inactivación inmediata, las AgNPs alcanzaron 100% de eliminación bacteriana con 3 mM y menor tiempo de incubación. En su forma liofilizada, las nanopartículas conservaron su actividad, logrando inhibición completa a 5 mg/L desde el inicio de la exposición. El extracto vegetal sin plata no presentó efecto bactericida significativo. Los resultados demuestran que la síntesis verde mediada por *M. charantia* produce nanopartículas de plata con elevada actividad antimicrobiana y mayor potencia que los iones metálicos libres bajo condiciones equivalentes. La interacción sinérgica entre la plata metálica y los metabolitos secundarios del extracto podría contribuir a la mejora en la eficacia observada. Esta aproximación representa una alternativa sustentable con potencial de escalamiento industrial para el control de patógenos de interés agropecuario, en concordancia con un enfoque sanitario y las estrategias de mitigación de la resistencia antimicrobiana.

INTRODUCCIÓN

La resistencia antimicrobiana se reconoce actualmente como una amenaza crítica de alcance global, con implicaciones simultáneas para la salud humana, la salud animal, los sistemas de producción y la estabilidad de los ecosistemas. Su abordaje demanda un enfoque One Health, capaz de integrar procesos biológicos, prácticas productivas, condiciones ambientales y dinámicas de transmisión. Esta visión resulta especialmente pertinente cuando se considera que la presión de selección asociada al uso intensivo de antimicrobianos y la circulación de microorganismos resistentes en ambientes de producción pueden amplificar riesgos sanitarios y ecológicos de largo plazo (United

Nations, 2024; Agga & Amenu, 2024; Woolhouse, 2024; GBD 2021 Antimicrobial Resistance Collaborators, 2024).

En este escenario, las nanopartículas de plata (AgNPs) han cobrado relevancia por su reconocida actividad antimicrobiana y por la diversidad de sectores donde ya tienen presencia tecnológica. Su interés no se limita al ámbito biomédico, ya que también se han discutido sus posibles aplicaciones en inocuidad alimentaria, producción animal y agricultura. Una de sus ventajas potenciales es que su acción no depende de un único mecanismo, lo que las convierte en candidatas prometedoras para el desarrollo de estrategias complementarias frente a microorganismos con perfiles de resistencia complejos. Además, el uso de nanoplata (*nanosilver*) en el sector agropecuario sugiere un campo aún abierto para innovaciones con enfoque ambiental y sanitario (Kaiser et al., 2023; Mgadi et al., 2024; Hill & Li, 2017; Yang et al., 2024).

Sin embargo, la utilidad de estos materiales no puede desvincularse del modo en que son producidos. Los métodos convencionales de síntesis suelen implicar mayor consumo energético o el uso de reactivos peligrosos, por lo que la síntesis verde mediante extractos vegetales ha ganado interés como una vía más compatible con los principios de la química sustentable. En este tipo de sistemas, los compuestos bioactivos de la planta actúan como agentes reductores y estabilizantes, favoreciendo tanto la formación del nanomaterial como su estabilidad. En particular, *Momordica charantia* resulta atractiva por tratarse de una especie comestible y medicinal con abundantes metabolitos funcionales y antecedentes de uso en la síntesis de nanopartículas con actividad biológica (Ahmed et al., 2016; Nahar et al., 2015; Saeed et al., 2018; Moorthy et al., 2021; Rashid et al., 2017).

TEORÍA

La síntesis vegetal de nanopartículas metálicas se apoya en procesos de reducción de iones, nucleación, crecimiento y recubrimiento superficial mediados por biomoléculas presentes en los extractos. Los fenoles, glicósidos, saponinas, alcaloides, flavonoides y otros metabolitos secundarios pueden favorecer la conversión de Ag^{+} a Ag^{0} y, al mismo tiempo, contribuir a la estabilización del sistema, disminuyendo la agregación. Esta dualidad funcional explica por qué los extractos vegetales no deben considerarse simples aditivos del proceso, sino matrices reactivas que influyen de manera decisiva en la química superficial, el tamaño y el comportamiento biológico del material nanoestructurado (Ahmed et al., 2016; Anand et al., 2022; Nahar et al., 2015; Saeed et al., 2018).

Desde el punto de vista microbiológico, las nanopartículas de plata pueden afectar a las bacterias mediante mecanismos múltiples, entre ellos el daño a membrana, la alteración de la permeabilidad celular, el colapso osmótico, la generación de especies reactivas de oxígeno y la afectación del material genético. Esta naturaleza multiblanco constituye una ventaja frente a agentes cuya acción depende de una sola ruta molecular. No obstante, esa misma reactividad obliga a examinar con rigor sus posibles efectos sobre organismos no objetivo, microbiotas benéficos y matrices ambientales complejas. Por ello, la innovación en nanotecnología ambiental no puede evaluarse solo por la eficiencia antimicrobiana, sino también por su seguridad, trazabilidad y gobernanza del riesgo (Kaiser et al., 2023; Anand et al., 2022; Mgadi et al., 2024).

EXPERIMENTAL

Para la obtención del extracto vegetal se emplearon frutos completos de *Momordica charantia*, previamente lavados y fragmentados, los cuales fueron sometidos a calentamiento en agua ultrapura durante 30 min a 90 °C. Tras filtración y almacenamiento en refrigeración, el extracto se utilizó como matriz biogénica para la síntesis de nanopartículas de plata. El proceso de optimización consideró variaciones en pH, volumen de extracto, concentración de plata y tiempo de reacción. La condición seleccionada como más favorable correspondió a pH 9 y a una formulación con extracto vegetal en proporción elevada respecto al precursor metálico, con una concentración final de nitrato de plata de 2 mM. Posteriormente, el material se recuperó por centrifugación, lavado y liofilización para su caracterización y evaluación antimicrobiana.

La caracterización incluyó espectroscopía UV-Vis para seguir la formación del nanomaterial, espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier para identificar grupos funcionales asociados con el recubrimiento orgánico, microscopía electrónica para describir morfología y distribución de tamaño, y análisis elemental por espectroscopía dispersiva de rayos X. La actividad antimicrobiana se evaluó frente a *Escherichia coli* ATCC25922 en medio TSB, comparando la respuesta del cultivo ante plata iónica, nanopartículas en suspensión y nanopartículas en forma de polvo. La eficacia se cuantificó mediante conteo de unidades formadoras de colonia a distintos tiempos de incubación y cálculo de porcentaje de eliminación.

RESULTADOS

La formación del nanomaterial fue evidente desde la etapa de reacción, debido al cambio de coloración de la mezcla desde tonos amarillentos hacia una suspensión parda oscura, comportamiento típico de la reducción de plata y de la aparición del fenómeno de resonancia de plasmones superficiales. Los espectros UV-Vis mostraron máximos de absorción en el intervalo de 420 a 450 nm, coherentes con la presencia de nanopartículas de plata. Se observó además que el aumento del volumen de extracto favoreció la intensidad de la señal hasta una condición óptima, mientras que el incremento de la concentración metálica con bajo contenido de extracto limitó la eficiencia del proceso. Este comportamiento respalda la idea de que la disponibilidad de biomoléculas reductoras y estabilizantes constituye un factor crítico para la formación controlada de nanopartículas, tal como se ha descrito en estudios previos sobre síntesis vegetal de nano-plata (Ahmed et al., 2016; Nahar et al., 2015).

El análisis morfológico mostró partículas predominantemente alargadas, cercanas a una forma tipo varilla, con longitudes aproximadas de 20 a 70 nm en la fracción de mayor tamaño y presencia de agregación (Figura 1). También se identificó una población menor de partículas más pequeñas y esféricas, con tamaño promedio de 14.5 ± 8.2 nm. La caracterización elemental reveló una señal dominante de plata alrededor de 3 keV, acompañada por carbono, oxígeno y cloro, con porcentajes en masa cercanos a 36.0, 4.5 y 3.8, respectivamente. En conjunto, estos resultados sugieren que el material mantiene una interfase orgánica proveniente del extracto vegetal, lo que puede influir en su estabilidad y en su interacción con los microorganismos. La relevancia de la morfología y la química superficial en el desempeño antimicrobiano ha sido ampliamente discutida en la literatura sobre nanopartículas de origen vegetal (Banerjee et al., 2014; Ahmed et al., 2016; Moorthy et al., 2021).

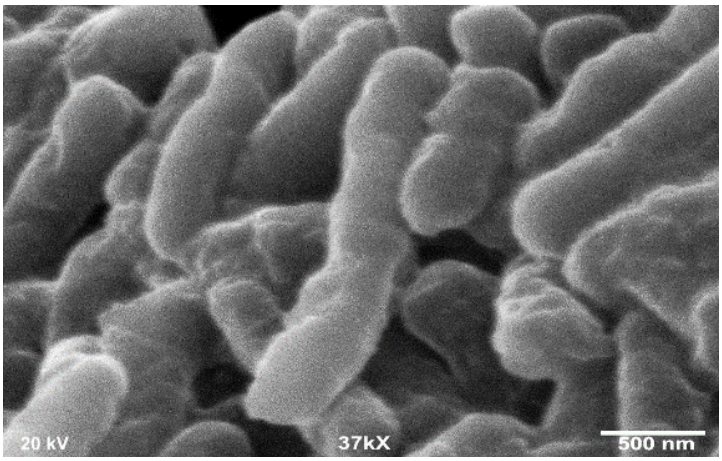


Figura 1. Imágenes de microscopía de barrido de las nanopartículas de plata sintetizadas con *Momordica charantia* mostrando una morfología alargada.

En la evaluación microbiológica, la plata iónica mostró capacidad de inactivación sobre *E. coli*, pero requirió concentraciones más elevadas y mayores tiempos de exposición para alcanzar eliminación total (Figura 2). En contraste, el sistema nanoparticulado sintetizado con extracto vegetal logró una

respuesta más rápida y eficiente. La inactivación completa se alcanzó con aproximadamente 3 mM de plata en presencia del extracto, aún con cargas bacterianas iniciales elevadas, mientras que el extracto vegetal por sí solo no produjo reducción apreciable del crecimiento. La comparación directa entre ambos tratamientos mostró que la formulación nanoestructurada permitió lograr 100 % de eliminación con menor dosificación relativa de plata y en menor tiempo de incubación. Estos resultados son consistentes con la noción de que la síntesis verde no solo modifica el modo de producción del material, sino también su desempeño funcional, probablemente por cambios en el área superficial, la estabilidad y la química interfacial del nanomaterial (Kaiser et al., 2023; Antunes Filho et al., 2025).

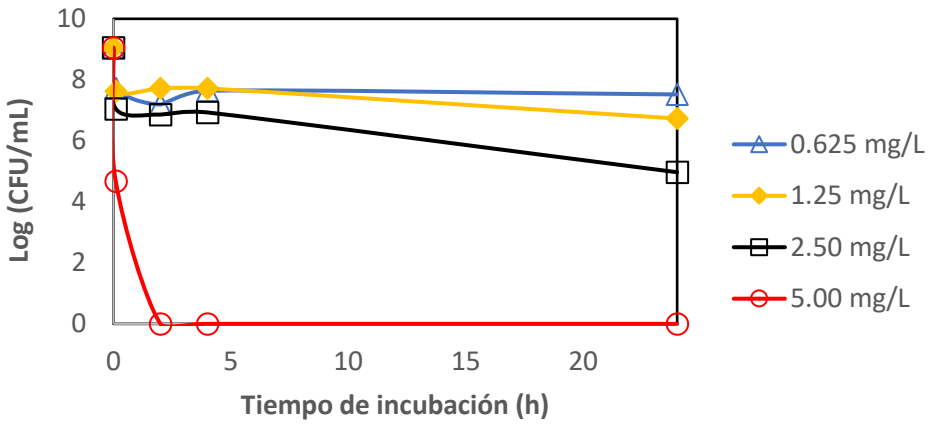


Figura 2. Efecto de *E. coli* expuesto a las nanopartículas de plata con el extracto de *Momordica* charantia en forma de polvo.

La forma liofilizada del material conservó actividad antimicrobiana relevante. Las concentraciones más bajas del polvo nanoparticulado, entre 0.625 y 2.50 mg/L, produjeron reducciones parciales del orden de 1 a 3 unidades logarítmicas tras 24 h; en cambio, la concentración de 5.00 mg/L logró eliminación total en tiempos cortos, incluso desde el tiempo inicial de incubación reportado. Desde la perspectiva operativa, este hallazgo es importante porque la forma sólida favorece manejo, almacenamiento y dosificación. No obstante, el propio estudio reconoce que la comparación entre plata iónica, nanopartículas en suspensión y nanopartículas en polvo se apoya principalmente en tendencias observadas en gráficas y tablas, por lo que una prueba comparativa más robusta requerirá un mayor número de réplicas y validación estadística formal. Esta observación es metodológicamente valiosa, ya que evita sobredimensionar el alcance inferencial de los resultados.

Desde una visión de pertinencia social e innovación, el estudio propone una ruta promisoria para producir materiales antimicrobianos a partir de una planta ampliamente disponible, con una lógica de menor dependencia de reactivos agresivos. Sin embargo, una nanotecnología ambientalmente responsable exige ir más allá de la eficacia *in vitro*. El escalamiento requiere demostrar rendimiento, reproducibilidad, costo-eficiencia y compatibilidad ambiental, así como generar evidencia sólida sobre toxicidad en humanos, animales y organismos no blanco. En este sentido, la síntesis biogénica ofrece ventajas de biocompatibilidad y menor agresividad química, pero no exime de realizar evaluación integral de riesgos. La verdadera innovación radica en que el material pueda desempeñarse eficazmente sin desplazar el problema microbiológico hacia nuevas formas de exposición o perturbación ecológica (Anand et al., 2022; Kaiser et al., 2023; Mgadi et al., 2024).

CONCLUSIONES

La síntesis verde de nanopartículas de plata mediante extracto de *M. charantia* permitió obtener un nanomaterial con características estructurales compatibles con actividad antimicrobiana significativa frente a *E. coli*. Las condiciones alcalinas favorecieron la formación del sistema, y la caracterización

confirmó la presencia de nanopartículas con morfología predominantemente alargada y con componentes superficiales asociados a biomoléculas vegetales. En términos funcionales, el material nanoestructurado mostró mayor potencia que la plata iónica sola y mantuvo actividad en forma de polvo, lo que amplía su interés práctico. Pese a ello, su eventual aplicación en sistemas ambientales o agroproductivos debe sustentarse en estudios adicionales de reproducibilidad, evaluación toxicológica, comportamiento ambiental y análisis integral de riesgo. Así, el principal valor científico de esta contribución reside en mostrar que la convergencia entre química verde, ciencia de materiales y salud ambiental puede generar alternativas tecnológicas prometedoras, siempre que se desarrollen bajo criterios rigurosos de seguridad y sustentabilidad (Anand et al., 2022; Kaiser et al., 2023; United Nations, 2024).

BIBLIOGRAFÍA

1. Agga, G. E., & Amenu, K. (2024). Editorial: Antimicrobial resistance in food-producing environments: A One Health approach. *Frontiers in Antibiotics*, 3.
2. Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2016). “A review on plants extract mediated synthesis of silver nanoparticles for antimicrobial applications: A green expertise”. Journal of Advanced Research, 7, 17–28.
3. Anand, U., Carpena, M., Kowalska-Góralska, M., Garcia-Perez, P., Sunita, K., Bontempi, E., Dey, A., Prieto, M. A., Proćków, J., & Simal-Gandara, J. (2022). “Safer plant-based nanoparticles for combating antibiotic resistance in bacteria: A comprehensive review on its potential applications, recent advances, and future perspective”. Science of the Total Environment, 821.
4. Antunes Filho, S., Almeida, C. M., Romanos, M. T. V., Pizzorno Backx, B., & Regina Bonelli, R. (2025). “Green synthesis of silver nanoparticles for functional cotton fabrics: Antimicrobial efficacy against multidrug-resistant bacteria and cytotoxicity evaluation”. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology, 53, 153–165.
5. Banerjee, P., Satapathy, M., Mukhopahayay, A., & Das, P. (2014). “Leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles from widely available Indian plants: Synthesis, characterization, antimicrobial property and toxicity analysis”. Bioresources and Bioprocessing, 1.
6. GBD 2021 Antimicrobial Resistance Collaborators. (2024). “Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: A systematic analysis with forecasts to 2050”. The Lancet, 404, 1199–1226.
7. Hill, E. K., & Li, J. (2017). “Current and future prospects for nanotechnology in animal production”. Journal of Animal Science and Biotechnology, 8, 26.
8. Kaiser, K. G., Delattre, V., Frost, V. J., Buck, G. W., Phu, J. V., Fernandez, T. G., & Pavel, I. E. (2023). “Nanosilver: An old antibacterial agent with great promise in the fight against antibiotic resistance”. Antibiotics, 12.
9. Mgadi, K., Ndaba, B., Roopnarain, A., Rama, H., & Adeleke, R. (2024). “Nanoparticle applications in agriculture: Overview and response of plant-associated microorganisms”. Frontiers in Microbiology, 15.
10. Moorthy, K., Chang, K.-C., Wu, W.-J., Hsu, J.-Y., Yu, P.-J., & Chiang, C.-K. (2021). “Systematic evaluation of antioxidant efficiency and antibacterial mechanism of bitter gourd extract stabilized silver nanoparticles”. Nanomaterials, 11.
11. Nahar, M. K., Zakaria, Z., Hashim, U., & Bari, M. F. (2015). “Green synthesis of silver nanoparticles using *Momordica charantia* fruit extracts”. Advanced Materials Research, 1109, 35–39.
12. Rashid, M. M. O., Akhter, K. N., Chowdhury, J. A., Hossen, F., Hussain, M. S., & Hossain, M. T. (2017). “Characterization of phytoconstituents and evaluation of antimicrobial activity of silver-extract nanoparticles synthesized from *Momordica charantia* fruit extract”. BMC Complementary and Alternative Medicine, 17.
13. Saeed, F., Muhammad, A., Bushra, N., Umair, A. M., Tabussam, T., Bilal, H. M., & Javed, A. (2018). “Bitter melon (*Momordica charantia*): A natural healthy vegetable”. International Journal of Food Properties, 21, 1270–1290.
14. United Nations. (2024). *Political declaration of the high-level meeting on antimicrobial resistance*.
15. Woolhouse, M. E. J. (2024). “One Health approaches to tackling antimicrobial resistance”. Science One Health, 3.

16. Yang, W., Li, J., Yao, Z., & Li, M. (2024). “A review on the alternatives to antibiotics and the treatment of antibiotic pollution: Current development and future prospects”. Science of the Total Environment, 926.

EVALUACIÓN ECOTOXICOLÓGICA AGUDA DEL INSECTICIDA DINOTEFURÁN EN LA MICROALGA CLOROFÍCEA *Scenedesmus Sp.*

Gerardo Solís González, Brad Genaro Reynoso Catalán, Alondra Alelie Cortés Téllez, Martha Estrella García Pérez y María Carmen Bartolomé Camacho

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
gerardo.solis@umich.mx

RESUMEN

Los insecticidas neonicotinoides son ampliamente utilizados en la agricultura debido a su alta eficacia como compuestos sistémicos de amplio espectro. El Dinotefurán, en particular, es un neonicotinoide de tercera generación altamente soluble en agua y con elevada movilidad ambiental, lo que favorece su dispersión hacia cuerpos de agua superficiales. Su mecanismo de acción se basa en la unión a los receptores nicotínicos de acetilcolina en el sistema nervioso de los insectos, provocando hiperexcitación neuronal y muerte; sin embargo, esta misma propiedad genera preocupación por sus posibles efectos en organismos no blanco. Diversos estudios han señalado que, aunque presenta menor afinidad por receptores de vertebrados, puede inducir efectos subletales en organismos acuáticos, incluyendo alteraciones en el crecimiento y metabolismo de microalgas. En este contexto, se evaluó la toxicidad aguda del Dinotefurán sobre Scenedesmus sp., una microalga de agua dulce con relevancia ecológica y potencial biotecnológico, con el objetivo de determinar su efecto sobre el crecimiento poblacional. Se realizaron bioensayos de 72 horas siguiendo la directriz 201 de la OCDE para pruebas de inhibición del crecimiento en microalgas. Se emplearon cultivos axénicos de Scenedesmus sp. mantenidos en medio nutritivo BG-11 bajo condiciones controladas (24 ± 2 °C, fotoperiodo 12:12 h luz-oscuridad e intensidad lumínica aproximada de 40 µmol m^{-2} s^{-1}). Los organismos fueron expuestos a concentraciones de Dinotefurán de 10, 25, 50, 75 y 100 mg L-1, utilizando tubos de 3 mL con doble cierre. La inhibición del crecimiento se evaluó mediante conteo celular a las 72 horas con microscopio óptico empleando cámara de Neubauer. La CI_{50} y CI_{100} se estimó mediante análisis de regresión lineal, mientras que la NOEC se determinó comparando los tratamientos con el control mediante ANOVA y pruebas de Tukey ($p < 0.05$). Los resultados mostraron una NOEC de 1.09 mg L^{-1}, lo que indica ausencia de efectos adversos detectables por debajo de este umbral. La CI_{50} fue de 16.79 mg L^{-1} (IC95%: 11.97–21.38 mg L^{-1}), evidenciando una inhibición significativa del crecimiento, mientras que la CI_{100} alcanzó los 257.63 mg L^{-1} (IC95%: 172.98–477.53 mg L^{-1}), correspondiente a una inhibición total. Estos resultados sugieren que Scenedesmus sp. presenta una menor sensibilidad al Dinotefurán en comparación con otras microalgas reportadas. En conjunto, los hallazgos permiten clasificar al Dinotefurán como moderadamente tóxico para esta especie y evidencian un cierto grado de tolerancia, lo que posiciona a Scenedesmus sp. como un organismo útil en estudios comparativos de sensibilidad y en bioensayos ecotoxicológicos. Asimismo, esta información contribuye a comprender los posibles efectos ambientales derivados del uso intensivo de plaguicidas sistémicos en ecosistemas acuáticos, reforzando la necesidad de establecer estrategias de regulación y manejo que mitiguen su impacto sobre organismos clave.

INTRODUCCIÓN

El uso de insecticidas neonicotinoides se ha incrementado de manera considerable en la agricultura moderna debido a su acción sistémica, amplio espectro de actividad y elevada eficacia contra insectos plaga. Estos compuestos son absorbidos por los tejidos vegetales y distribuidos a través de la planta, lo que permite proteger raíces, tallos y hojas durante distintas etapas del desarrollo del cultivo. Su mecanismo de acción se basa principalmente en la interacción con los receptores nicotínicos de acetilcolina del sistema nervioso de los insectos, provocando alteraciones en la transmisión sináptica, hiperexcitación neuronal, parálisis y muerte. Aunque esta selectividad ha favorecido su uso en diversos sistemas agrícolas, la persistencia, movilidad y dispersión ambiental de los neonicotinoides han generado preocupación por sus posibles efectos sobre organismos no

blanco y por su incorporación a ecosistemas acuáticos continentales (Morrissey et al., 2015; Ponce-Vejar et al., 2022).

El dinotefurán es un neonicotinoide de tercera generación utilizado para el control de plagas agrícolas. A diferencia de otros insecticidas con mayor afinidad por la materia orgánica del suelo, este compuesto presenta alta solubilidad en agua, bajo potencial de adsorción y elevada movilidad ambiental, características que favorecen su transporte hacia aguas superficiales y subterráneas mediante escorrentía, lixiviación, erosión del suelo y deriva durante la aplicación agrícola (U.S. EPA, 2004). La detección de neonicotinoides y sus productos de transformación en cuerpos de agua cercanos a zonas de cultivo confirma que estos compuestos pueden desplazarse desde áreas agrícolas hacia sistemas acuáticos receptores. En este sentido, Xiong et al. (2021) reportaron la presencia de diversos neonicotinoides en aguas agrícolas, destacando al dinotefurán como uno de los compuestos dominantes en sistemas conectados a zonas de cultivo. Esta evidencia refuerza la necesidad de evaluar sus efectos en organismos acuáticos no blanco, particularmente en aquellos que cumplen funciones ecológicas esenciales.

Las microalgas dulceacuícolas constituyen uno de los componentes más importantes de los ecosistemas acuáticos, ya que participan en la producción primaria, la oxigenación del medio, el reciclaje de nutrientes y el sostenimiento de redes tróficas. Debido a su rápido crecimiento, sensibilidad fisiológica y respuesta directa ante cambios físicos y químicos del ambiente, las microalgas son ampliamente utilizadas como modelos biológicos en bioensayos de toxicidad y como bioindicadores de contaminación acuática (Martínez-Burgos et al., 2024). La prueba de inhibición del crecimiento en microalgas de agua dulce, descrita en la directriz 201 de la OCDE, es uno de los enfoques más empleados para evaluar los efectos de sustancias químicas sobre organismos fotosintéticos, ya que permite estimar parámetros toxicológicos como concentraciones inhibitorias y niveles sin efecto observado a partir de respuestas de crecimiento poblacional (OECD, 2011).

Dentro de este grupo, el género *Scenedesmus* se caracteriza por su amplia distribución en ambientes dulceacuícolas, su capacidad para formar cenobios y su importancia ecológica dentro del fitoplancton. De acuerdo con AlgaeBase, Scenedesmus incluye organismos unicelulares o coloniales, comúnmente organizados en cenobios de 2 a 32 células, con presencia principalmente en lagos y estanques de agua dulce, especialmente en sistemas eutróficos (Guiry & Guiry, 2026). Además de su relevancia ecológica, especies de este género han sido empleadas en estudios de ecotoxicología y biorremediación debido a su tolerancia variable frente a contaminantes orgánicos e inorgánicos, así como a su utilidad para comparar respuestas de sensibilidad entre microalgas clorofitas.

Diversos estudios han demostrado que los neonicotinoides pueden modificar la fisiología de organismos fotosintéticos, aunque las respuestas dependen del compuesto evaluado, la especie, la cepa, la concentración y el tiempo de exposición. En microalgas, se han reportado desde efectos inhibitorios sobre el crecimiento hasta respuestas de tolerancia o estimulación a determinadas concentraciones, como se ha observado en estudios con imidacloprid en *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus* sp. (Adochite & Andronic, 2021; Cheng et al., 2024; Lozano et al., 2025). Esta variabilidad evidencia la importancia de generar información específica para cada insecticida y organismo de prueba, especialmente en el caso del dinotefurán, cuya toxicidad sobre microalgas dulceacuícolas ha sido menos documentada que la de otros neonicotinoides.

En este contexto, el presente trabajo evaluó la toxicidad aguda del dinotefurán sobre *Scenedesmus* sp. mediante bioensayos de inhibición del crecimiento durante 72 horas. La finalidad del estudio fue determinar el efecto del insecticida sobre el crecimiento poblacional de la microalga y aportar información ecotoxicológica útil para valorar el riesgo potencial de plaguicidas sistémicos en organismos fotosintéticos no blanco de ecosistemas dulceacuícolas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Cepa y condicones de cultivo.

Se utilizó la microalga *Scenedesmus* sp., obtenida del cepario del laboratorio de Toxicología Ambiental de la Facultad de Químico Farmacobiología de la UMSNH. Los cultivos se mantuvieron en medio BG-11 (Sigma-Aldrich), en frascos de cultivo de 50 mL (Grainer, Bio-One), bajo condiciones controladas de 24 ± 1 °C, fotoperiodo de 12:12 h (luz:oscuridad). La intensidad lumínica se fijó en 60 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ mediante lámparas LED blancas.

Preparación de la sustancia de prueba.

El insecticida dinotefuran (20 % concentración, VENOM, Valent) se disolvió en agua destilada estéril para preparar una solución madre (1g L^{-1}). A partir de esta, se realizaron diluciones seriadas en el medio de cultivo para obtener las concentraciones de exposición: 10-100 mg L^{-1}.

Diseño experimental.

Los bioensayos se efectuaron en tubos de doble cierre (Sarstedt, Nümbrecht, Germany) de acuerdo con lo dicho por la directriz 201 de la OCDE. Se inocularon 104 células mL^{-1} de Scenedesmus sp en cada réplica. Se incluyeron controles negativos (sin exposición) y dos réplicas por tratamiento para un total de ocho réplicas (n=8). La duración del ensayo fue de 72 h.

Variables medidas.

El crecimiento celular se evaluó mediante conteo directo en cámara de Neubauer bajo microscopio óptico (Carl Zeiss). A partir de los datos de densidad celular, se calculó la tasa de crecimiento específico y la inhibición relativa respecto al control.

Análisis de datos.

Los valores de CI50, CI100 y NOEC se determinaron mediante ajuste de curvas de inhibición lineales (modelo logístico de cuatro parámetros) con el software GraphPad Prism v9.3. Se calcuaron intervalos de confianza al 95 %. La clasificación de toxicidad se realizó conforme a los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La exposición de *Scenedesmus* sp. al insecticida neonicotinoide dinotefuran mostró un patrón de inhibición dependiente de la concentración tras 72 horas de ensayo. Durante las primeras 24 horas no se observaron diferencias significativas en la densidad celular entre los tratamientos y el control. Sin embargo, a partir de las 48 horas se evidenció una disminución progresiva del crecimiento en concentraciones superiores a 10 mg/L (Tabla 1).

Tabla 12. Toxicidad del insecticida dinotefuran sobre *Scenedesmus* sp tras 72 h de exposición.

Organismo	Parámetro	[ ] mg/L
***Scenedesmus* sp.**	NOEC	1.09
	CI_{50}	16.79 (11.97 – 21.38)
	CI_{100}	257.63 (172.98 – 477.53)

El análisis de inhibición relativa permitió estimar los parámetros ecotoxicológicos de referencia. La Concentración Sin Efecto Observable (NOEC) se determinó en 1.09 mg/L, lo que refleja una menor sensibilidad de Scenedesmus sp. en comparación con otras microalgas previamente evaluadas. La Concentración Inhibitoria 50 (CI_{50}) se calculó en 16.79 mg/L con un intervalo de confianza del 95% de 11.97–21.38 mg/L, mientras que la Concentración Inhibitoria 100 (CI_{100}) alcanzó los 257.63 mg/L (IC95%: 172.98–477.53 mg/L).

De acuerdo con los criterios de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2023), estos valores permiten clasificar al dinotefuran como moderadamente tóxico para microalgas de agua dulce (Tabla 2). La curva dosis-respuesta ajustada mostró un incremento marcado en la inhibición del crecimiento a partir de 50 mg/L, aunque la población mantuvo una respuesta parcial en concentraciones intermedias (Figura 2).

Tabla 13. Categorización de xenobióticos de acuerdo con su toxicidad en organismos acuáticos. (US-EPA, 2023).

Categoría	[ ] mg/L	Descripción
I	< 1	Muy tóxico
II	1-10	Tóxico
III	10-100	Moderadamente tóxico
IV	> 100	No tóxico

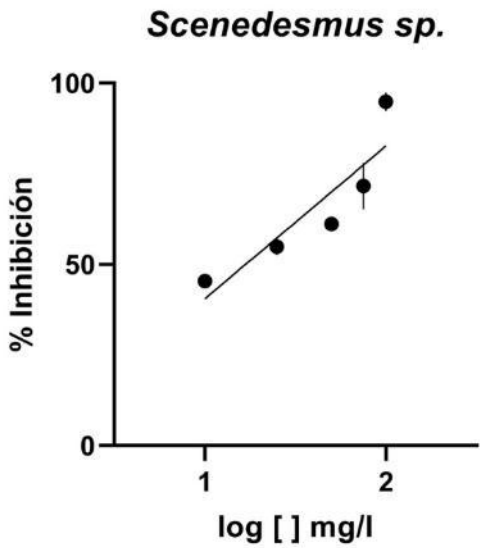


Figura 17. Curva concentración-respuesta de la toxicidad del dinotefuran sobre *Scenedesmus* sp tras 72 h de exposición. El incremento en la concentración de dinotefuran es proporcional al porcentaje de inhibición celular de *Scenedesmus* sp.

Estos hallazgos son relevantes porque aportan evidencia sobre los riesgos ecotoxicológicos del dinotefuran en ambientes continentales, donde *Scenedesmus* sp. es un componente habitual del fitoplancton. La información generada contribuye a ampliar el conocimiento sobre los efectos de neonicotinoides poco estudiados y refuerza la necesidad de incluir microalgas de agua dulce en los esquemas de evaluación y regulación ambiental de plaguicidas sistémicos.

Los resultados obtenidos evidencian que el dinotefurán produjo una inhibición del crecimiento de Scenedesmus sp. dependiente de la concentración después de 72 h de exposición. La NOEC de 1.09 mg L^{-1} indica que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento por debajo de este umbral. Sin embargo, la disminución progresiva de la densidad celular en los tratamientos superiores demuestra que el dinotefurán puede ejercer efectos adversos sobre organismos fotosintéticos no blanco, aun cuando su mecanismo de acción primario esté dirigido al sistema nervioso de insectos.

La CI50 de 16.79 mg L^{-1} permite ubicar la respuesta de Scenedesmus sp. dentro de un intervalo de sensibilidad baja a intermedia frente al dinotefurán. Este valor resulta relevante al compararse con reportes regulatorios donde se han descrito valores de toxicidad algal para dinotefurán superiores a

100 mg L^{-1}, lo que sugiere que la cepa evaluada en este estudio podría presentar mayor sensibilidad que otros modelos algales empleados en evaluaciones estandarizadas. No obstante, esta comparación debe interpretarse con cautela, ya que las diferencias entre especies, cepas, condiciones de cultivo, fuente de inóculo, intensidad lumínica, medio nutritivo y endpoint toxicológico pueden modificar la respuesta observada.

Al contrastar estos resultados con estudios realizados con otros neonicotinoides, se observa que la sensibilidad de Scenedesmus sp. se aproxima a la reportada para Chlorella vulgaris expuesta a imidacloprid, donde se ha descrito una EC50-72 h cercana a 13 mg L^{-1} (Adochite & Andronic, 2021). Esta similitud sugiere que, aunque los neonicotinoides no tienen como blanco primario a las microalgas, pueden generar alteraciones fisiológicas detectables mediante la inhibición del crecimiento. En contraste, estudios recientes con Scenedesmus sp. expuesta a imidacloprid han mostrado respuestas de tolerancia e incluso capacidad de remoción del compuesto, lo que refuerza la idea de que la susceptibilidad a neonicotinoides puede variar ampliamente entre cepas y condiciones experimentales (Cheng et al., 2024).

La CI100 estimada de 257.63 mg L^{-1} debe considerarse con precaución, debido a que supera el intervalo de concentraciones evaluado experimentalmente. Por tanto, este valor representa una proyección del modelo de regresión y no una inhibición total observada directamente en el bioensayo. Aun así, su estimación permite describir la tendencia concentración–respuesta y sugiere que Scenedesmus sp. mantiene cierto grado de tolerancia frente al dinotefurán, especialmente si se compara con organismos acuáticos más sensibles a plaguicidas sistémicos.

Los efectos inhibitorios observados podrían estar asociados con alteraciones indirectas en procesos celulares esenciales, como la división celular, el metabolismo fotosintético, la homeostasis redox o la asimilación de nutrientes. En microalgas, la reducción del crecimiento constituye un endpoint ecotoxicológico relevante porque refleja afectaciones integradas sobre el metabolismo y la capacidad de proliferación poblacional. Dado que estos organismos participan en la producción primaria, la oxigenación del medio y el sostenimiento de redes tróficas dulceacuícolas, cualquier disminución en su crecimiento puede tener implicaciones ecológicas a nivel comunitario.

Los resultados indican que el dinotefurán puede afectar el crecimiento de Scenedesmus sp. bajo condiciones controladas de laboratorio. Aunque la especie mostró cierta tolerancia, la respuesta concentración–efecto confirma la utilidad de esta microalga como modelo bioindicador en estudios comparativos de sensibilidad frente a plaguicidas sistémicos. Estos hallazgos contribuyen a ampliar la información disponible sobre los efectos de neonicotinoides en productores primarios acuáticos y resaltan la importancia de incluir microalgas dulceacuícolas en programas de evaluación y monitoreo ecotoxicológico de cuerpos de agua expuestos a contaminación agrícola.

CONCLUSIONES

El dinotefurán inhibió el crecimiento de *Scenedesmus* sp. de manera dependiente de la concentración después de 72 h de exposición. La NOEC de 1.09 mg L^{-1} y la CI50 de 16.79 mg L^{-1} indican que esta microalga presenta una sensibilidad baja a intermedia frente al insecticida bajo las condiciones evaluadas.

Aunque *Scenedesmus* sp. mostró cierto grado de tolerancia, los efectos observados evidencian que el dinotefurán puede afectar organismos fotosintéticos no blanco en ambientes dulceacuícolas. Por ello, esta especie representa un modelo útil para estudios comparativos de sensibilidad y para la evaluación ecotoxicológica de plaguicidas sistémicos de uso agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adochite, C., & Andronic, L. (2021). Toxicity of a binary mixture of TiO_2 and imidacloprid applied to Chlorella vulgaris. International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(15), 7785. https://doi.org/10.3390/ijerph18157785
2. Cheng, Y., Wang, H., Wu, Y., Ding, Y., Peng, C., Qi, C., Xu, A., & Liu, Y. (2024). Light-powered biodegradation of imidacloprid by Scenedesmus sp. TXH202001: Assessing complete removal, metabolic pathways, and toxicity verification. Journal of Hazardous Materials, 477, 135345. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135345
3. Guiry, M. D., & Guiry, G. M. (2026). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway.
4. Martínez-Burgos, W. J., Pozzan, R., de Carvalho, J. C., Cavali, M., Mariano, A. B., Vargas, J. V. C., Ordonez, J., Severo, I. A., & Soccol, C. R. (2024). The role of microalgae as bioindicators of aquatic contamination. In Algae as a Natural Solution for Challenges in Water-Food-Energy Nexus (pp. 323–347). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2371-3_13
5. Morrissey, C. A., Mineau, P., Devries, J. H., Sanchez-Bayo, F., Liess, M., Cavallaro, M. C., & Liber, K. (2015). Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: A review. Environment International, 74, 291–303. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.024
6. OECD. (2011). Test No. 201: Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264069923-en
7. Ponce-Vejar, G., Ramos de Robles, S. L., Macias-Macias, J. O., Petukhova, T., & Guzman-Novoa, E. (2022). Detection and concentration of neonicotinoids and other pesticides in honey from honey bee colonies located in regions that differ in agricultural practices: Implications for human and bee health. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(13), 8199. https://doi.org/10.3390/ijerph19138199
8. U.S. EPA. (2004). Pesticides fact sheet for dinotefuran. United States Environmental Protection Agency.
9. Xiong, J., Tan, B., Ma, X., Li, H., & You, J. (2021). Tracing neonicotinoid insecticides and their transformation products from paddy field to receiving waters using polar organic chemical integrative samplers. Journal of Hazardous Materials, 413, 125421. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125421

VALORIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE PTAR EN PRODUCTOS CERÁMICOS

Ethnice Dehonor-Márquez, Lucia García-Guzmán, Paula Deyanira Orantes-Calleja, María del Rosario Mejía-Cuero, Adán Jiménez-Montoya y Yesenia Pérez-Jiménez.

Tecnológico de Estudios Superiores de San Felipe del Progreso
ethnice.dm@sfelipeprogreso.tecnm.mx

RESUMEN

Los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) constituyen un gran reto ambiental, por lo que su valorización como materia prima en la fabricación de productos cerámicos representa una alternativa sostenible. Este enfoque evalúa la incorporación de biosólidos estabilizados en mezclas arcillosas para la producción de ladrillos y macetas, analizando propiedades fisicoquímicas, comportamiento durante la cocción y desempeño mecánico del material final. Los resultados reportados indican que, bajo condiciones controladas, es posible obtener productos con resistencia estructural adecuada, reducción de densidad y adecuada inmovilización de contaminantes debido a las altas temperaturas de sinterización. Asimismo, esta estrategia contribuye a la economía circular al disminuir la disposición final de residuos y el uso de materias primas vírgenes.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y la expansión de los sistemas de saneamiento han incrementado significativamente la generación de lodos residuales. Estos materiales contienen materia orgánica, minerales, nutrientes y trazas de contaminantes que dificultan su disposición final. Tradicionalmente los lodos son enviados a rellenos sanitarios o sometidos a procesos de disposición que generan costos elevados. En este contexto, la valorización material mediante su incorporación en productos cerámicos surge como una alternativa tecnológica viable [1,2].

En respuesta a esta problemática, diversos estudios han explorado alternativas de valorización orientadas a transformar los biosólidos en recursos aprovechables dentro de esquemas de economía circular [1]. Entre estas alternativas destaca su incorporación en materiales de construcción, particularmente en productos cerámicos como ladrillos y macetas, debido a la presencia de compuestos minerales compatibles con las arcillas utilizadas convencionalmente en la industria cerámica [2,4].

Las investigaciones desarrolladas durante las últimas dos décadas han demostrado que la incorporación controlada de biosólidos estabilizados puede producir materiales con propiedades físicas y mecánicas adecuadas para aplicaciones constructivas y ornamentales, además de favorecer la inmovilización de contaminantes durante los procesos de cocción [3,5]. Esta estrategia permite reducir el consumo de materias primas vírgenes, disminuir la cantidad de residuos destinados a disposición final y contribuir a la implementación de modelos productivos más sostenibles [3,5].

Por lo anterior, el presente trabajo analiza la valorización de lodos residuales de PTAR mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos y macetas cerámicas, evaluando los fundamentos técnicos, ambientales y económicos que sustentan esta alternativa como una estrategia de economía circular y desarrollo sostenible.

TEORÍA

Los lodos residuales son subproductos generados durante los procesos físicos, químicos y biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Su producción ha aumentado significativamente debido al crecimiento poblacional, la expansión de la infraestructura sanitaria y el fortalecimiento de la normatividad ambiental. Sin embargo, la gestión de estos residuos continúa representando uno de los principales desafíos para los operadores de PTAR debido a los costos asociados con su transporte, estabilización y disposición final [1].

La composición de los lodos varía en función del tipo de agua tratada y del proceso empleado. Generalmente contienen materia orgánica, sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxidos de hierro (Fe_2O_3), calcio (CaO), magnesio (MgO), fósforo y otros minerales que presentan características similares a las materias primas utilizadas en la industria cerámica [2]. Estas propiedades han impulsado diversas investigaciones orientadas a su aprovechamiento como sustitutos parciales de la arcilla en productos cerámicos.

Por otro lado, la industria cerámica tradicional consume grandes cantidades de recursos naturales, principalmente arcillas extraídas de bancos minerales. La incorporación de lodos residuales permite reducir parcialmente la demanda de estas materias primas, al tiempo que proporciona una alternativa de valorización para un residuo de difícil manejo [3].

Diversos estudios han demostrado que los biosólidos estabilizados pueden incorporarse en porcentajes comprendidos entre 5 y 20 % en peso sin afectar significativamente la calidad final de ladrillos, tejas y bloques [4]. Durante la cocción, la materia orgánica presente en el lodo se volatiliza, generando poros que disminuyen la densidad aparente del material y mejoran ciertas propiedades térmicas, mientras que los componentes minerales participan en la formación de nuevas fases cristalinas que contribuyen a la estabilidad estructural del producto [5].

La sinterización constituye una de las etapas más importantes de la fabricación cerámica. Durante este proceso, realizado generalmente entre 900 y 1100 °C, ocurren reacciones físico-químicas que favorecen la consolidación del material y la formación de una matriz estable [4].

Uno de los principales beneficios ambientales de este proceso es la inmovilización de contaminantes potencialmente presentes en los biosólidos. Los metales pesados pueden quedar atrapados dentro de la estructura vítrea y cristalina formada durante la cocción, reduciendo significativamente su movilidad y lixiviación [6]. Esta característica convierte a la tecnología cerámica en una alternativa segura para el aprovechamiento de residuos provenientes de PTAR.

La economía circular es un modelo productivo orientado a maximizar el aprovechamiento de recursos y minimizar la generación de residuos mediante estrategias de reutilización, reciclaje y valorización. A diferencia del modelo lineal tradicional de "extraer-producir-desechar", la economía circular busca mantener los materiales dentro del ciclo productivo durante el mayor tiempo posible [2].

La valorización de lodos residuales en productos cerámicos constituye un claro ejemplo de economía circular, ya que transforma un residuo potencialmente problemático en una materia prima secundaria con valor agregado. Esta estrategia permite cerrar ciclos de materiales, reducir la dependencia de recursos naturales y disminuir los impactos asociados a la disposición final de residuos [7].

Además, la integración de PTAR y productores cerámicos puede generar esquemas de simbiosis industrial en los cuales los residuos de una actividad se convierten en insumos para otra, fortaleciendo cadenas productivas regionales y promoviendo una gestión más eficiente de los recursos [8].

El desarrollo sostenible implica satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. En este contexto, la valorización de biosólidos contribuye simultáneamente a las dimensiones ambiental, económica y social de la sostenibilidad.

Desde el punto de vista ambiental, reduce la cantidad de residuos enviados a disposición final y disminuye la extracción de arcillas naturales. Económicamente, reduce costos de manejo de lodos y consumo de materias primas. Socialmente, promueve la innovación tecnológica, la generación de empleos verdes y el fortalecimiento de capacidades técnicas locales [8].
Asimismo, esta estrategia se encuentra alineada con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente: el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima).

PARTE EXPERIMENTAL

La presente investigación es de tipo aplicada y experimental, ya que busca generar una solución tecnológica a una problemática ambiental mediante el aprovechamiento de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la fabricación de productos cerámicos. Es aplicada porque persigue la utilización práctica del conocimiento científico para la valorización de residuos, y experimental debido a que se manipula deliberadamente la variable independiente, correspondiente al porcentaje de incorporación de lodos en mezclas arcillosas, con el propósito de evaluar su efecto sobre las propiedades físicas, mecánicas y ambientales de los productos obtenidos. La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la medición y análisis de variables numéricas obtenidas mediante ensayos de laboratorio. Entre las variables evaluadas se encuentran la humedad, densidad aparente, absorción de agua, contracción durante el secado y la cocción, resistencia mecánica, composición química y comportamiento de lixiviación. Los resultados obtenidos permitirán realizar comparaciones estadísticas entre tratamientos y determinar la influencia del contenido de lodo sobre el desempeño de los materiales cerámicos. El diseño experimental considera la comparación estadística entre tratamientos para determinar la proporción óptima de incorporación de lodos residuales.

Materiales

- Lodos residuales provenientes de PTAR municipal.
- Mezcla de arcillas.
- Agua potable.
- Moldes para ladrillos.
- Moldes para macetas.
- Bolsas de muestreo herméticas.
- Etiquetas de identificación.
- Recipientes plásticos para almacenamiento.
- Papel aluminio.
- Bolsas Ziploc.
- Crisol de porcelana.
- Charolas metálicas para secado.
- Pala de acero inoxidable.
- Espátulas.
- Balanza portátil.
- Estufa de secado (60–105 °C).
- Horno mufla.
- Desecador
- Molino o triturador.
- Mortero de porcelana.
- Kit de Tamices
- Tamizador mecánico
- Potenciómetro (pH).
- Conductímetro.
- Balanza analítica
- Estufa de humedad.
- Equipo para materia orgánica
- Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).
- Sistema EDS (Energy Dispersive Spectroscopy).
- Difractómetro de Rayos X (DRX).
- Equipo TGA/DTA.
- Mezcladora de barro
- Mesa de trabajo.
- Moldes para macetas.
- Moldes para ladrillos.
- Termopares.
- Controlador de temperatura.
- Máquina universal de ensayos.
- Vernier digital.
- Picnómetro.
- Recipientes para absorción de agua.

METODOLOGÍA

En la Fig. 1, se muestra la metodología utilizada



Fig. 1. Metodología para la valorización de lodos residuales de PTAR en productos cerámicos (ladrillos y macetas).

RESULTADOS

Los resultados reportados en la literatura científica muestran que la incorporación de biosólidos estabilizados en matrices cerámicas es técnicamente viable para la fabricación de ladrillos y macetas

cuando se utilizan proporciones adecuadas y se controlan las condiciones de procesamiento [1,4]. En la Figura 2 se ilustran las diferentes etapas realizadas para el proceso de obtención de macetas.



Fig. 2. Fotografías del proceso de elaboración de macetas en el Estado de México.

Uno de los efectos más observados es la disminución de la densidad aparente conforme aumenta el contenido de lodo. Este comportamiento se atribuye principalmente a la combustión de la materia orgánica durante la cocción, lo que genera una estructura más porosa [5]. La reducción de densidad puede representar una ventaja para aplicaciones donde se buscan productos más ligeros, particularmente en macetas ornamentales y elementos constructivos no estructurales.
De manera paralela, diversos autores reportan incrementos en la absorción de agua debido al aumento de la porosidad interna. Sin embargo, este efecto puede controlarse mediante ajustes en la temperatura de cocción y en la proporción de biosólidos incorporados. Temperaturas superiores a 950 °C favorecen procesos de vitrificación que disminuyen la conectividad de los poros y mejoran la estabilidad del material [4].

Respecto al comportamiento mecánico, las investigaciones indican que porcentajes de incorporación comprendidos entre 5 y 15 % permiten mantener resistencias compatibles con aplicaciones comerciales. Cusidó y Cremades [6] reportaron que los ladrillos fabricados con biosólidos presentaron resistencias adecuadas para usos constructivos convencionales, manteniendo además niveles seguros de lixiviación de contaminantes.

En el caso específico de las macetas, la mayor porosidad derivada del uso de lodos residuales puede representar una ventaja funcional. La presencia de poros facilita el intercambio de humedad y aire en la zona radicular, favoreciendo el desarrollo vegetal y mejorando las condiciones de cultivo en aplicaciones hortícolas y forestales.

En las Figuras 3 y 4, muestran los resultados obtenidos del análisis de materias primas de macetas, es decir la mezcla de arcillas utilizada por los artesanos para su elaboración, así como la de los lodos incorporados. Mientras que la tabla 1,

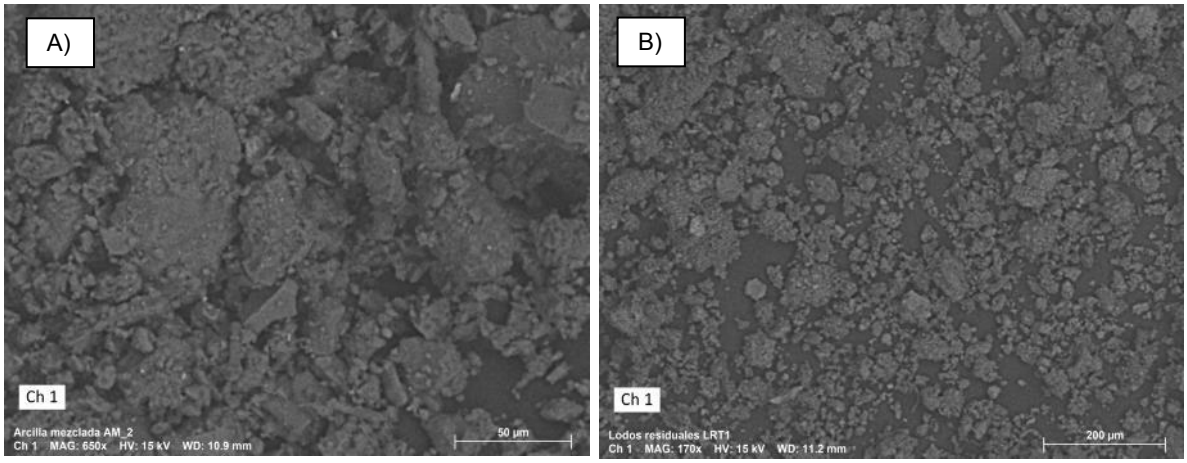


Fig. 3. Micrografías de SEM de materias primas de macetas: A) Mezcla de arcillas y B) Lodos residuales.

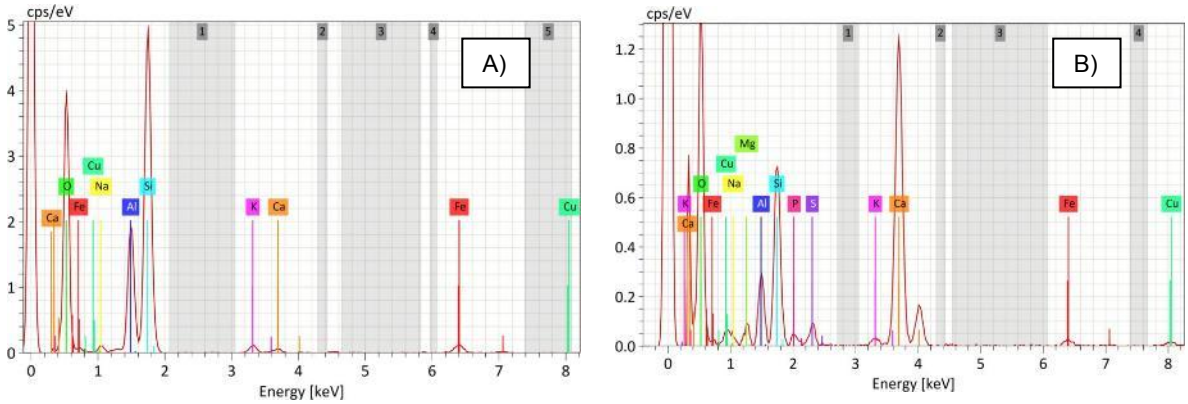


Fig. 4. Espectro de análisis elemental (EDS) de: A) Mezcla de arcillas y B) Lodos residuales.

Derivado de los espectros de EDS de los principales componentes de los materiales cerámicos, se obtiene la tabla siguiente.

Tabla 1. Tabla comparativa de composiciones

Parámetro	Mezcla de arcillas	Lodos Residuales de PTAR (tratados con cal)
Si (%)	30.27	7.90
Al (%)	11.00	3.16
Fe (%)	3.37	1.43
Ca (%)	0.59	26.11
P (%)	No detectado	0.59
S (%)	No detectado	1.07

Los resultados obtenidos, muestran que la composición de la mezcla de arcillas, es típica de una materia prima cerámica aluminosilicática.

La relación:

$$\frac{Si}{Al} = 2.75 \qquad (1)$$

es consistente con mezclas de Caolinita, Illita y Cuarzo libre. La elevada proporción de Si y Al confirma que la matriz principal corresponde a minerales arcillosos tradicionales empleados en macetas, ladrillos, tejas y cerámica estructural. El hierro (3.37 %) explica la coloración rojiza que desarrollará la pasta tras la cocción.

Por otro lado, el calcio domina la composición del lodo (26.11 % Ca), derivado del proceso de inactivación de microorganismos patógenos, mostrando un valor alto para un biosólido convencional. Normalmente los lodos municipales presentan entre el 2 al 10 % de Ca, difícilmente superando el 15 %. Por lo que la estabilización con cal quedó claramente evidenciada por EDS.

En este momento se continúan realizando análisis de caracterización de las materias primas al tiempo que de desarrollan las combinaciones de concentraciones de lodos residuales en las macetas y se tiene pendiente el proceso de ladrillos.

En términos económicos, la utilización de biosólidos permite reducir costos asociados a la disposición final de residuos y disminuir parcialmente el consumo de arcilla virgen. En regiones donde coexisten PTAR y talleres o industrias cerámicas, esta estrategia puede favorecer la creación de cadenas de suministro circulares con beneficios para productores, operadores de saneamiento y consumidores finales [2].

Finalmente, el análisis integral de los estudios disponibles confirma que la valorización de lodos residuales en ladrillos y macetas constituye una alternativa técnicamente viable, ambientalmente segura y económicamente atractiva. No obstante, se recomienda continuar desarrollando investigaciones piloto y estudios de ciclo de vida para optimizar porcentajes de incorporación, evaluar impactos a largo plazo y fortalecer la transferencia tecnológica hacia el sector productivo.

CONCLUSIONES

La valorización de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos y macetas cerámicas representa una alternativa técnicamente viable para el aprovechamiento de residuos, al permitir su transformación en productos con potencial aplicación comercial y valor agregado. La compatibilidad mineralógica existente entre los biosólidos estabilizados y las materias primas arcillosas favorece su integración en matrices cerámicas sin comprometer significativamente las propiedades funcionales del producto final cuando se emplean porcentajes adecuados de sustitución [2,4,5].

Los antecedentes científicos analizados demuestran que la incorporación controlada de lodos residuales en proporciones comprendidas generalmente entre 5 y 15 % permite obtener materiales con propiedades físicas y mecánicas comparables a las de productos cerámicos convencionales. Asimismo, la disminución de densidad observada en diversos estudios puede representar una ventaja para determinadas aplicaciones, particularmente en la fabricación de macetas y elementos constructivos ligeros [2,4,6].

Los resultados del análisis mediante SEM, indican que la arcilla aporta la fase estructural principal (Si–Al), mientras que el lodo estabilizado aporta una importante fracción de calcio que puede actuar como agente fundente durante la cocción. Esto es particularmente interesante porque disminuye el requerimiento de arcilla virgen, favorece la sinterización, incrementa el potencial de valorización del residuo y puede mejorar la eficiencia energética del proceso cerámico. Por ello, desde un punto de vista tecnológico, el lodo no debe considerarse únicamente como un residuo incorporado a la matriz, sino como un material secundario con capacidad de modificar favorablemente la química de cocción. El elevado contenido de calcio observado mediante EDS se atribuye principalmente a la adición de cal durante la etapa de estabilización e higienización del biosólido, seguida de procesos de hidratación y carbonatación durante el secado al aire.

Desde el punto de vista ambiental, la tecnología cerámica constituye una alternativa segura para la valorización de biosólidos debido a que las elevadas temperaturas de sinterización favorecen la

inmovilización de contaminantes potencialmente presentes en los lodos, reduciendo significativamente los riesgos de lixiviación y contaminación secundaria. Esta característica fortalece la viabilidad ambiental del aprovechamiento de residuos en productos cerámicos y contribuye a disminuir la cantidad de materiales destinados a disposición final [3,5].

La propuesta desarrollada se encuentra alineada con los principios de la economía circular al transformar un residuo de manejo complejo en una materia prima secundaria susceptible de reincorporarse a cadenas productivas existentes. Este enfoque permite reducir la extracción de recursos naturales, optimizar el uso de materiales y promover modelos de producción más sostenibles basados en la valorización de residuos y la eficiencia de recursos [7,9,10].

En el ámbito socioeconómico, la implementación de estrategias de aprovechamiento de biosólidos puede generar beneficios para las regiones donde operan simultáneamente plantas de tratamiento y productores cerámicos, al reducir costos de disposición final, disminuir el consumo de materias primas vírgenes y fortalecer cadenas de valor locales vinculadas a la construcción, la jardinería y la manufactura de productos cerámicos sostenibles [1,7].

La investigación permitió establecer que el enfoque experimental propuesto constituye una herramienta adecuada para evaluar la influencia del porcentaje de incorporación de lodos sobre las propiedades finales de ladrillos y macetas, proporcionando bases técnicas para futuras aplicaciones a escala piloto e industrial. La caracterización fisicoquímica, mineralógica y mecánica de las mezclas resulta fundamental para garantizar la calidad, seguridad y desempeño de los productos obtenidos. Finalmente, se concluye que la valorización de lodos residuales de PTAR en productos cerámicos contribuye simultáneamente a la gestión sostenible de residuos, al fortalecimiento de la economía circular y al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente aquellos relacionados con la producción y consumo responsables, la innovación industrial y la construcción de comunidades más sostenibles [8]. Se recomienda desarrollar estudios complementarios a escala piloto e industrial que incluyan análisis de ciclo de vida, evaluación económica detallada y pruebas de durabilidad a largo plazo, con el fin de consolidar la transferencia tecnológica hacia el sector productivo.

Por lo anterior, las aportaciones de la investigación son:

1. Demuestra la factibilidad de reutilizar lodos de PTAR en productos cerámicos.
2. Contribuye a la reducción de residuos enviados a disposición final.
3. Favorece la disminución del consumo de arcillas naturales.
4. Promueve modelos de economía circular y simbiosis industrial.
5. Genera una alternativa con potencial impacto económico regional.
6. Proporciona bases técnicas para escalamiento industrial.

BIBLIOGRAFÍA

1. X. Chen, J. Zhang, Y. Chen and X. Li, “Valorization of Sewage Sludge in the Fabrication of Construction and Building Materials: A Review”, Resour. Conserv. Recycl., Vol. 154, 2020, Article 104606. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606
2. A. G. Liew, A. Idris, C. H. K. Wong, A. A. Samad, M. J. M. Noor and A. M. Baki, “Incorporation of Sewage Sludge in Clay Brick and its Characterization”, Waste Manage. Res., Vol. 22, No. 4, 2004, pp. 226–233. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X04044989
3. J. A. Cusidó and L. V. Cremades, “Environmental Effects of Using Clay Bricks Produced with Sewage Sludge: Leachability and Toxicity Studies”, Waste Manage., Vol. 32, No. 6, 2012, pp. 1202–1208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.024
4. H. Mao, Y. Zhang, X. Wang and J. Liu, “Recycling Sewage Sludge into Ceramic Materials: A Review”, Environ. Chem. Lett., Vol. 21, 2023, pp. 1127–1150. DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-022-01550-6

5. S. N. Monteiro and C. M. F. Vieira, “Incorporation of Sludge Waste from Water Treatment Plant into Red Ceramic”, Constr. Build. Mater., Vol. 22, No. 6, 2008, pp. 1281–1287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.013
6. M. M. Jordán, M. A. Montero and T. Sanfeliu, “Influence of Sewage Sludge Additions on Ceramic Properties”, Appl. Clay Sci., Vol. 95, 2014, pp. 148–154.DOI: https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.021
7. Ellen MacArthur Foundation, “Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition”, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, UK, 2013.
8. United Nations, “Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development”, United Nations, New York, NY, USA, 2015.
9. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), “Circular Economy and Industrial Resource Efficiency”, UNIDO Publications, Vienna, Austria, 2019.
10. European Commission, “Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe”, European Commission, Brussels, Belgium, 2020.

EVALUACIÓN CFD DE GEOMETRÍAS DE IMPULSOR EN UN CRISOL TRONCOCÓNICO DE LABORATORIO PARA PROCESOS STIR-CASTING DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Alejandra Vega Laguna[1], Gabriel Rodríguez Ortiz[1], Juan Gregorio Hortelano Capetillo[1], José Merced Martínez Vázquez[2]

[1]Ingeniería en Metalúrgica, Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Juventino Rosas, Gto., México, [2]Ingeniería en Manufactura Avanzada, Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Juventino Rosas, Gto., México.
grodriguez@upjr.edu.mx

RESUMEN

El proceso de colada con agitación (stir casting) para la fabricación de compuestos de matriz de aluminio requiere condiciones hidrodinámicas y térmicas controladas para garantizar estabilidad del baño metálico y homogeneidad del sistema. En crisoles de laboratorio de geometría troncocónica y capacidad reducida, la configuración del impulsor constituye el principal mecanismo para modificar el patrón de flujo, debido a las limitaciones geométricas que dificultan la implementación de deflectores internos. En este trabajo se presenta un estudio numérico del sistema crisol-impulsor mediante simulación CFD, con el propósito de caracterizar el comportamiento hidrodinámico y térmico del baño en condiciones representativas de operación experimental. El crisol modelado presenta una altura interna de 15 cm, diámetro superior de 10.5 cm y diámetro inferior de 4 cm. Se consideró un nivel de llanado del 80% de su capacidad volumétrica, correspondiente aproximadamente a 1.15 kg de aluminio líquido y una altura de baño cercana a 12 cm. Se evaluaron tres configuraciones de impulsor con diámetro de 3.5 cm (relación D/T≈0.47 en la zona de mezcla), manteniendo una separación aproximada de 4 cm desde el fondo del crisol. Se analizaron tres velocidades de agitación representativas del rango experimental (300, 450 y 600 rpm), considerando regiones rotatorias en el dominio del fluido. La caracterización hidrodinámica se realizó mediante el análisis del campo de velocidades, identificación de patrones de recirculación y cuantificación de zonas de baja renovación de fluido a partir de un umbral de velocidad definido. Adicionalmente, se implementó un modelo de transferencia de calor conjugada entre el metal fundido y el crisol, permitiendo determinar la distribución transiente de temperatura y los gradientes térmicos bajo distintas condiciones de agitación. El modelo describe la influencia de geometría del impulsor sobre la estructura del flujo en un sistema troncocónico y caracterizar la respuesta térmica del baño ante variaciones en la velocidad de rotación.

INTRODUCCIÓN

La simulación CFD de sistemas de agitación es relevante en la metalurgia de procesos debido a que permite analizar, con resolución espacial, la interacción entre geometría del impulsor, velocidad de rotación y renovación del fluido en recipientes donde el acceso experimental al campo de flujo es limitado. En procesos stir casting, la hidrodinámica del baño condiciona la incorporación de partículas, la reducción de regiones con baja renovación y la estabilidad del flujo durante la fabricación de compuestos de matriz de aluminio [1-4].

Estudios previos han demostrado que el diseño del agitador, la velocidad de agitación, el ángulo de las aspas y la relación geométrica entre impulsor y recipiente son variables críticas en la calidad de los productos obtenidos por stir casting [1-3]. Muhammad y Jalal reportaron que el diseño del agitador y la velocidad de rotación modifican el desempeño de mezclado y, por consecuencia, la distribución de partículas cerámicas en matrices de aluminio [1,2]. En sistemas agitados, los trabajos CFD han mostrado que la comparación de campos de velocidad, estructuras de recirculación, torque y variables globales de mezclado permite interpretar diferencias de desempeño que no se observan de forma directa desde el exterior del recipiente [5-9].

A pesar de estos avances, aún existe incertidumbre respecto al desempeño hidrodinámico de impulsores de geometría simple operando en crisoles troncocónicos de laboratorio, particularmente cuando el sistema carece de deflectores internos y se trabaja con volúmenes reducidos de aleaciones de aluminio líquido. Esta condición es importante porque el uso de deflectores no siempre es viable en crisoles pequeños, ya sea por restricciones geométricas, limpieza del sistema o interferencia con la operación experimental.

Esta limitación impide seleccionar la configuración de impulsor y la velocidad de rotación con base en criterios hidrodinámicos cuantitativos. En ausencia de esta comparación, el diseño de la agitación puede depender de observaciones cualitativas, lo que incrementa el riesgo de generar regiones de baja velocidad, recirculación localizada o mezclado insuficiente. Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar, mediante software CFD, el campo de velocidades generado por tres geometrías de impulsor en un crisol troncocónico de laboratorio bajo condiciones representativas de stir casting de aleaciones de aluminio.

Se hipotetiza que el incremento de la velocidad de rotación aumenta la velocidad promedio y la velocidad máxima del baño, mientras que la geometría del impulsor modifica la distribución espacial de la energía cinética dentro del crisol. Bajo esta hipótesis, el desempeño hidrodinámico debe evaluarse mediante indicadores globales y locales: velocidad promedio, velocidad máxima, torque y distribución espacial del campo de velocidades.

TEORÍA

Metodología CFD

Las simulaciones se desarrollaron empleando un análisis CFD interno, dependiente del tiempo e isotérmico. El modelo activó flujo de fluido y desactivó conducción de calor en sólidos, radiación, medios porosos y gravedad. El fluido simulado fue aluminio A380 líquido a 893.15 K, con densidad constante de 2534.28 kg/m³ y propiedades requeridas introducidas en el software. La formulación isotérmica permitió aislar el efecto hidrodinámico de la geometría del impulsor y de la velocidad de rotación, sin acoplar transferencia de calor en esta etapa del estudio.

El movimiento del impulsor se representó mediante una región rotatoria definida alrededor de las aspas. Las velocidades angulares correspondientes a 300, 450 y 600 rpm fueron 31.42, 47.12 y 62.83 rad/s, respectivamente. Este tratamiento es consistente con metodologías CFD para sistemas agitados, donde el dominio se divide en una zona móvil asociada al impulsor y una zona estacionaria correspondiente al recipiente [5,8,10]. Como condiciones generales de frontera se consideraron paredes sólidas sin deslizamiento en el crisol y en las superficies del agitador, dominio interno cerrado y presión de referencia cercana a 101.3 kPa.

El resumen computacional documenta, para el esquema base A1, una malla de 101,136 celdas de fluido, 5,256 celdas de fluido en contacto con sólidos, nivel máximo de refinamiento 3 y malla básica de 14 x 14 x 16 celdas. La confiabilidad de resultados CFD en tanques agitados depende de la discretización, del refinamiento cerca del impulsor y del acoplamiento presión-velocidad [8,11]. Por ello, aunque los resultados permiten una comparación preliminar entre geometrías, la versión experimental posterior debe incluir verificación de independencia de malla con al menos tres niveles de refinamiento.

El modelo matemático se fundamentó en la conservación de masa y cantidad de movimiento para un fluido newtoniano incompresible. La ecuación de continuidad se expresa como:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

donde $\mathbf{u}$ es el vector de velocidad. En un marco inercial, la ecuación de Navier-Stokes se escribe como:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}\right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{S} \tag{2}$$

En la región rotatoria se introduce la velocidad angular $\mathbf{\Omega}$. La velocidad absoluta se relaciona con la velocidad relativa mediante:

$$\mathbf{u}_{abs} = \mathbf{u}_{rel} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r} \tag{3}$$

donde $\mathbf{u}_{abs}$ es la velocidad absoluta del fluido, $\mathbf{u}_{rel}$ es la velocidad relativa en el sistema de referencia rotatorio, $\mathbf{\Omega}$ es la velocidad angular del impulsor y $\mathbf{r}$ es el vector de posición medido desde el eje de rotación. El término $\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}$ representa la contribución tangencial inducida por la rotación de la región móvil.

Para un marco rotatorio uniforme, los términos fuente asociados a aceleraciones aparentes pueden escribirse como:

$$\mathbf{S}_R = -\rho[2\mathbf{\Omega} \times \mathbf{u}_{rel} + \mathbf{\Omega} \times (\mathbf{\Omega} \times \mathbf{r})] \tag{4}$$

donde el primer término corresponde a la contribución de Coriolis y el segundo a la contribución centrífuga. Para el tratamiento turbulento se emplea la descomposición de Reynolds:

$$u_i = \overline{u_i} + u_i', \qquad p = \overline{p} + p' \tag{5}$$

donde u_i es la componente instantánea de la velocidad en la dirección i, $\bar{u_\iota}$ es su valor medio y u_i' representa la fluctuación turbulenta asociada al campo de velocidad. De forma análoga, $p$corresponde a la presión instantánea, $\bar{p}$ a la presión media y p' a la fluctuación de presión. Esta descomposición permite formular las ecuaciones RANS, resolviendo el comportamiento medio del flujo y representando el efecto de las fluctuaciones turbulentas mediante términos adicionales, conocidos como esfuerzos de Reynolds. Para describir el flujo turbulento del baño metálico se emplearon las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas de Reynolds, RANS, considerando un fluido newtoniano e incompresible. La conservación de masa se expresa como:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{6}$$

mientras que la conservación de cantidad de movimiento se escribe como:

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{u_i{}'u_j{}'}\right] + S_{R,i} \tag{7}$$

donde $\bar{u_\iota}$ y $\bar{u_j}$ son las componentes medias de velocidad, x_i y $x_j$son las coordenadas espaciales, ρ es la densidad del fluido, $\bar{p}$ es la presión media, μ es la viscosidad dinámica y $-\rho\bar{u_i'}\bar{u_j'}$ representa los esfuerzos de Reynolds originados por las fluctuaciones turbulentas. El término $S_{R,i}$ agrupa las contribuciones fuente asociadas al sistema rotatorio, como los efectos centrífugos y de Coriolis en la región móvil.

Debido a que el promediado de Reynolds introduce el término $-\rho\bar{u_i'}\bar{u_j'}$, asociado a los esfuerzos turbulentos, el sistema de ecuaciones requiere un modelo de cierre. En este trabajo se empleó el modelo $k-\varepsilon$, en el cual los esfuerzos de Reynolds se aproximan mediante la hipótesis de Boussinesq. Esta hipótesis relaciona los esfuerzos turbulentos con los gradientes de velocidad media a través de una viscosidad turbulenta μ_t, permitiendo representar el efecto de las fluctuaciones turbulentas sin resolver directamente todas las escalas del flujo. Este enfoque es ampliamente utilizado en modelos RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes), también conocidos como modelos basados en las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas de Reynolds de tipo $k-\varepsilon$, donde los esfuerzos de Reynolds se incorporan mediante el concepto de viscosidad turbulenta.

$$-\rho\overline{u_i{}'u_j{}'} = \mu_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{8}$$

En la ecuación anterior, μ_t es la viscosidad turbulenta, k es la energía cinética turbulenta y δ_{ij} es la delta de Kronecker. El primer término del lado derecho representa la contribución viscosa turbulenta asociada a los gradientes de velocidad media, mientras que el segundo término corresponde a la contribución isotrópica de las fluctuaciones turbulentas. Las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y su tasa de disipación ε se expresan como:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho k\overline{u_j}\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\rho\varepsilon \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\varepsilon\overline{u_j}\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{10}$$

Las ecuaciones de transporte del modelo $k-\varepsilon$ permiten calcular la energía cinética turbulenta ky su tasa de disipación ε. La variable k cuantifica la intensidad de las fluctuaciones de velocidad, mientras que ε representa la velocidad con la que dicha energía turbulenta se disipa por efecto viscoso. En la ecuación de k, el término P_k representa la producción de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad media, mientras que $\rho\varepsilon$ corresponde a su disipación. En la ecuación de ε, los términos con $C_{\varepsilon1}$y $C_{\varepsilon2}$ controlan, respectivamente, la generación y destrucción de la tasa de disipación turbulenta.

La viscosidad turbulenta se calcula mediante:

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{11}$$

con constantes usuales $C_\mu=0.09$, $C_{\varepsilon1}=1.44$, $C_{\varepsilon2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$y $\sigma_\varepsilon=1.3$. El uso de RANS con cierre $k-\varepsilon$ es común en estudios de agitación porque reduce el costo computacional respecto a LES (Large Eddy Simulation) o DNS (Direct Numerical Simulation), y permite comparar campos medios de velocidad en función de la velocidad de rotación [6,9,12].

La implementación numérica del modelo CFD se realizó considerando un análisis de flujo interno, dependiente del tiempo e isotérmico, con aluminio A380 líquido como fluido de trabajo. Con el propósito de documentar las condiciones empleadas en la simulación y facilitar la reproducibilidad del estudio, en la Tabla 1 se resumen los principales parámetros computacionales definidos en el modelo.

Tabla 1. Parámetros físicos y computacionales empleados en la simulación CFD del sistema crisol–impulsor.

Parámetro documentado	**Valor**
Tipo de análisis	Flujo interno, dependiente del tiempo, isotérmico
Fluido simulado	Aluminio A380 líquido
Temperatura del fluido	893.15 K
Densidad del fluido	2534.28 kg/m^3
Celdas totales y de fluido	101,136
Celdas de fluido en contacto con sólidos	5,256
Nivel máximo de refinamiento	3
Malla básica	14 x 14 x 16

Modelo térmico conjugado

Para complementar la evaluación hidrodinámica, se desarrolló un modelo térmico conjugado aplicado al impulsor A1 de aspas rectas. En este caso, el análisis se mantuvo como flujo interno y dependiente del tiempo, pero se activó la conducción de calor en sólidos para acoplar la respuesta térmica del aluminio A380 líquido con la del crisol y los componentes sólidos del sistema. La radiación, la gravedad y los medios porosos permanecieron desactivados, por lo que la redistribución

térmica calculada se atribuye principalmente a la convección forzada inducida por el impulsor y al intercambio conductor entre el fluido y las superficies sólidas [6,9,14].

En el dominio fluido, el transporte de energía puede representarse mediante la ecuación de energía para un fluido incompresible con propiedades efectivas:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T_f \right) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T_f \right) + \Phi \tag{13}$$

donde T_f es la temperatura del fluido, c_p es el calor específico, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva y Φ representa la disipación viscosa, cuando ésta se considera relevante. En condiciones turbulentas, la conductividad efectiva incluye la contribución turbulenta, de manera análoga al tratamiento de viscosidad efectiva usado en el modelo de cantidad de movimiento.

$$k_{\text{eff}} = k_f + k_t, k_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \tag{14}$$

donde $k_f$es la conductividad térmica molecular, k_t es la conductividad turbulenta y Pr_t es el número de Prandtl turbulento. Esta formulación permite relacionar la intensidad de agitación con la redistribución térmica del baño, debido a que la mezcla turbulenta modifica simultáneamente el campo de velocidad y el transporte convectivo de energía.

En los dominios sólidos, el transporte de calor se describe mediante conducción transitoria:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \tag{15}$$

donde T_s, ρ_s, $c_{p,s}$ y k_s corresponden a la temperatura, densidad, calor específico y conductividad térmica del sólido, respectivamente. El acoplamiento fluido-sólido se establece imponiendo continuidad de temperatura y de flujo de calor normal en la interfaz:

$$T_f = T_s \tag{16}$$

$$-k_{\text{eff}} \nabla T_f \cdot \mathbf{n} = -k_s \nabla T_s \cdot \mathbf{n} \tag{17}$$

Estas condiciones corresponden al tratamiento de transferencia de calor conjugada, en el cual la convección dentro del fluido y la conducción en los sólidos se resuelven de forma acoplada. En recipientes agitados, este enfoque es útil cuando se requiere evaluar la interacción entre circulación del fluido, conducción a través de paredes o componentes sólidos y distribución térmica del volumen de trabajo [14].

PARTE EXPERIMENTAL

Sistema modelado

El sistema modelado corresponde a un crisol troncocónico de laboratorio con altura interna de 15 cm, diámetro superior de 10 cm y diámetro inferior de 4 cm. El nivel de llenado considerado fue de 80% de la capacidad volumétrica, equivalente a una altura aproximada de baño de 12 cm y a una masa cercana a 1.15 kg de aluminio líquido. Esta configuración reproduce una condición de operación frecuente en estudios experimentales de stir casting a escala de laboratorio, donde el volumen de metal es limitado y el espacio para elementos auxiliares de mezclado es reducido.

Se evaluaron tres configuraciones de impulsor con diámetro de 3.5 cm: A1, impulsor de aspas rectas; A2, impulsor con aspas inclinadas 30° respecto al eje; y A3, impulsor con aspas inclinadas 60° respecto al eje. En todos los casos se mantuvo una separación aproximada de 4 cm entre el impulsor y el fondo del crisol. Las velocidades de rotación analizadas fueron 300, 450 y 600 rpm, seleccionadas como niveles representativos del intervalo experimental previsto para agitación de baños metálicos de pequeña escala.

El objetivo de comparar estas configuraciones fue identificar la geometría que produce mayor renovación global del fluido, mayor velocidad promedio y menor tendencia a concentrar la velocidad únicamente en la vecindad del impulsor. La comparación se planteó bajo condiciones geométricas y

de operación equivalentes, de modo que las diferencias observadas se atribuyeran principalmente a la geometría del agitador y a la velocidad de rotación. De manera complementaria, para el impulsor A1 de aspas rectas se incorporó un análisis térmico conjugado, con el propósito de evaluar la distribución de temperatura del aluminio A380 líquido y su interacción térmica con el crisol y los componentes sólidos del sistema. Esta etapa permitió relacionar la respuesta hidrodinámica del baño con la uniformidad térmica alcanzada bajo las tres velocidades de rotación evaluadas.

RESULTADOS

Análisis hidrodinámico del baño para los impulsores evaluados

La comparación hidrodinámica se realizó a partir de los campos de velocidad, las visualizaciones vectoriales disponibles, la velocidad promedio, la velocidad máxima y el torque alrededor del eje Z. La velocidad promedio se utilizó como indicador de renovación global del baño, mientras que la velocidad máxima se interpretó como indicador de intensidad local de flujo o concentración de cizalla. El torque se empleó como una medida indirecta del esfuerzo requerido para sostener la agitación.

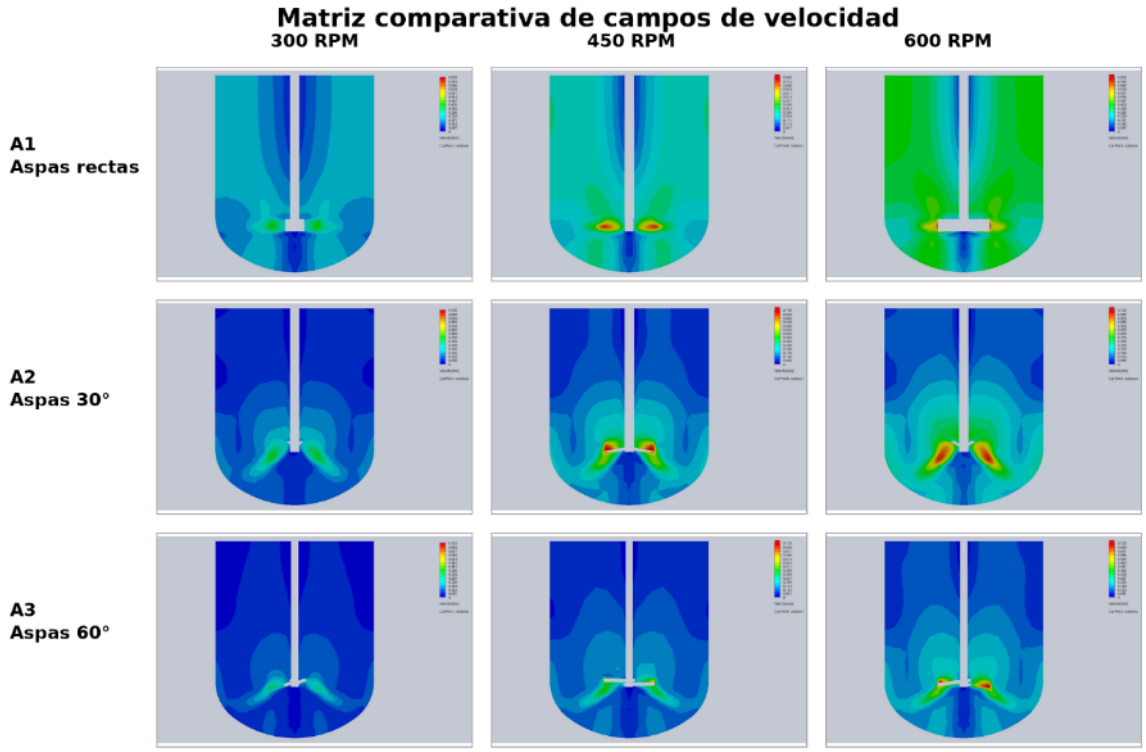


Figura 1. Matriz comparativa de campos de velocidad para las tres geometrías de impulsor y las tres velocidades de rotación evaluadas.

La Figura 1 presenta la matriz comparativa de campos de velocidad para las tres geometrías de impulsor y las tres velocidades de rotación evaluadas. En todos los casos, el aumento de rpm incrementó la intensidad del campo de velocidad. El impulsor A1 generó los valores más altos de velocidad promedio en los tres niveles de rotación, con 0.175, 0.267 y 0.360 m/s para 300, 450 y 600 rpm, respectivamente. Este comportamiento indica una mayor renovación global del fluido respecto a los impulsores inclinados.

Los contornos muestran que A1 distribuye la velocidad en una mayor extensión del baño. Esta tendencia coincide con la literatura de sistemas agitados, donde la geometría del impulsor modifica la estructura de recirculación, la disipación de energía y la distribución de partículas [1,3,7]. En stir casting, esta diferencia es crítica porque la distribución homogénea de partículas depende de la capacidad del impulsor para renovar el volumen del baño y reducir regiones de baja velocidad.

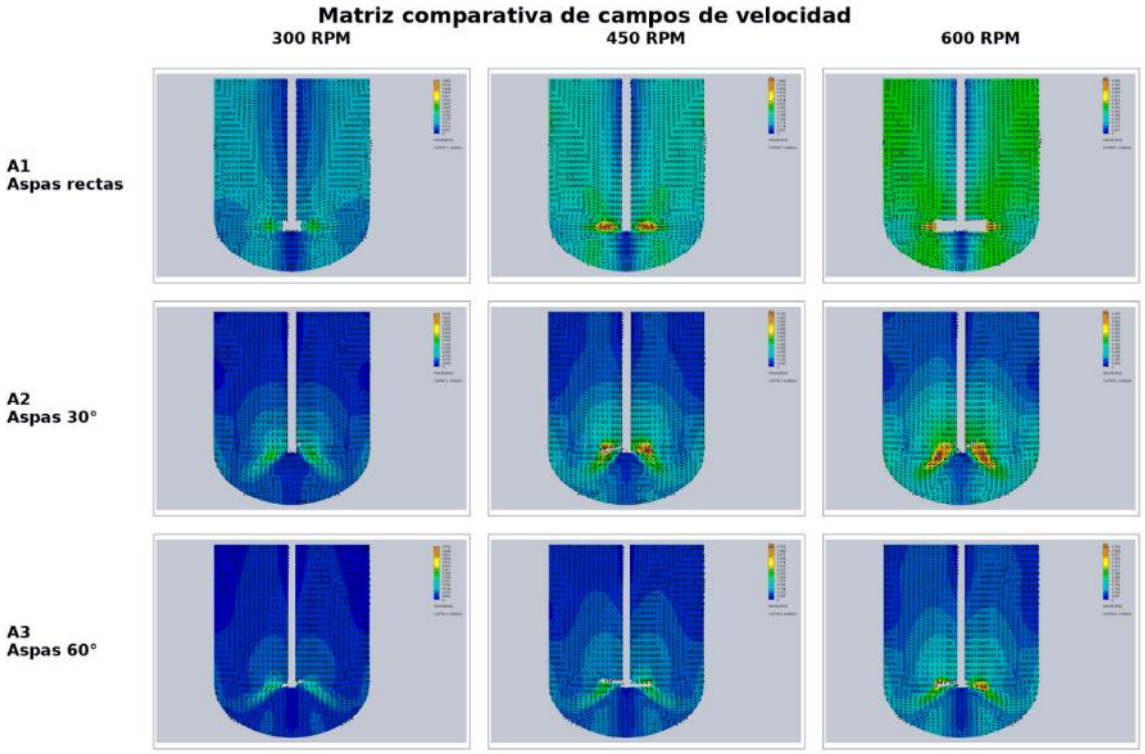


Figura 2. Matriz comparativa de vectores de velocidad para las tres geometrías de impulsor y las tres velocidades de rotación evaluadas.

Tabla 2. Indicadores hidrodinámicos obtenidos de las simulaciones CFD.

Impulsor	RPM	Velocidad promedio [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Torque Z absoluto [mN·m]
A1 - aspas rectas	300	0.175	0.673	1.04
A1 - aspas rectas	450	0.267	1.026	2.34
A1 - aspas rectas	600	0.360	1.382	4.04
A2 - aspas 30°	300	0.075	0.618	0.717
A2 - aspas 30°	450	0.114	0.927	1.57
A2 - aspas 30°	600	0.151	1.236	2.76
A3 - aspas 60°	300	0.057	0.700	0.416
A3 - aspas 60°	450	0.089	1.050	0.907
A3 - aspas 60°	600	0.118	1.362	1.59

La Tabla 2 resume los indicadores hidrodinámicos obtenidos. A 600 rpm, la velocidad promedio de A1 fue 2.38 veces mayor que la de A2 y 3.05 veces mayor que la de A3. Este resultado posiciona al impulsor de aspas rectas como la configuración con mayor desempeño hidrodinámico global en el sistema evaluado. La comparación también muestra que la velocidad máxima no debe emplearse como único criterio de mezclado: A3 alcanzó una velocidad máxima cercana a A1 en 600 rpm, pero su velocidad promedio fue considerablemente menor.

La Figura 3 confirma que la velocidad promedio aumenta con la velocidad de rotación para las tres geometrías. Esta tendencia es coherente con estudios de tanques agitados, donde el incremento de la velocidad de rotación intensifica la circulación y eleva la transferencia de cantidad de movimiento hacia el fluido [6,8,12]. En el presente sistema, el efecto de la velocidad de rotación no eliminó la influencia geométrica: A1 mantuvo la mayor velocidad promedio en los tres niveles de rpm.

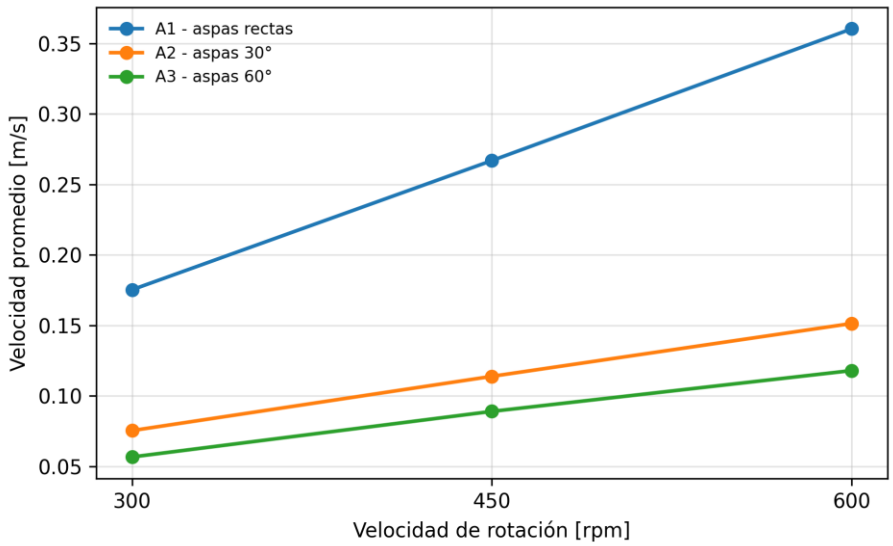


Figura 3. Velocidad promedio del baño en función de la velocidad de rotación.

La Figura 4 presenta la velocidad máxima en función de la velocidad de rotación. A1 y A3 muestran valores máximos cercanos a 600 rpm, con 1.382 y 1.362 m/s, respectivamente, mientras que A2 alcanzó 1.236 m/s. Esta similitud en picos locales no representa desempeño global equivalente. En mezclado, las estructuras turbulentas y los vórtices locales pueden aumentar la cizalla en zonas específicas, pero la calidad de mezclado depende de que esa energía se distribuya en el volumen del tanque [9,12].

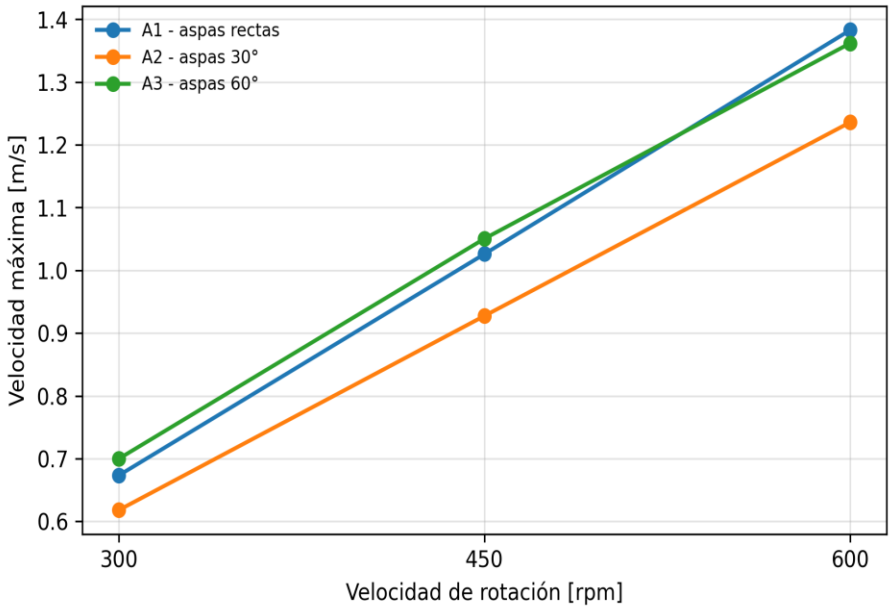


Figura 4. Velocidad máxima del baño en función de la velocidad de rotación.

El comportamiento del torque se muestra en la Figura 5. La magnitud del torque aumentó con la velocidad de rotación en todos los casos. A1 presentó la mayor demanda de torque, con 4.04 mN·m a 600 rpm, seguida por A2 con 2.76 mN·m y A3 con 1.59 mN·m. Esta tendencia es coherente con una mayor transferencia de cantidad de movimiento al fluido. Para aplicaciones de stir casting, el mejor desempeño debe equilibrar renovación del baño, demanda mecánica, estabilidad de la superficie libre e incorporación de partículas.

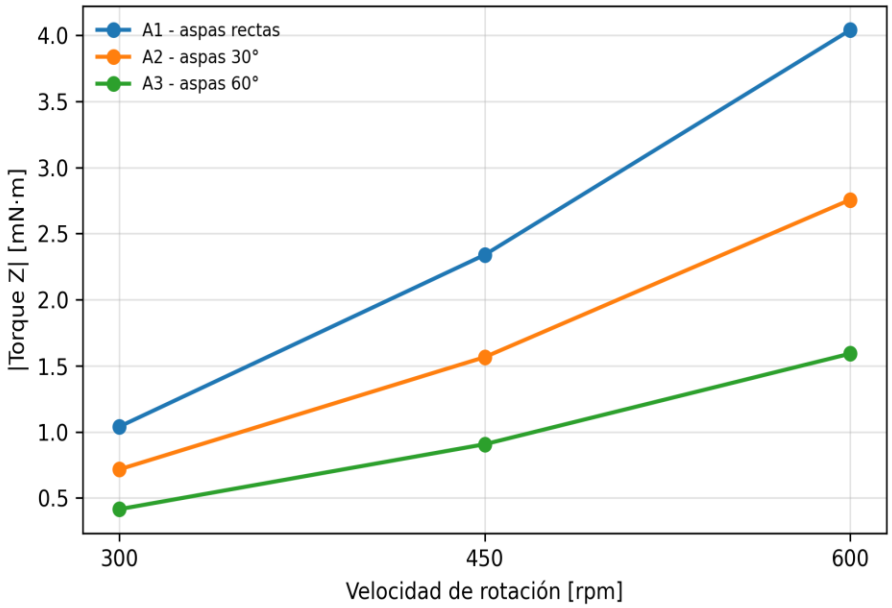


Figura 5. Magnitud del torque alrededor del eje Z en función de la velocidad de rotación.

La comparación con la literatura permite interpretar el resultado de manera más sólida. En estudios de stir casting, el diseño del agitador, el ángulo de las aspas y la velocidad de rotación se han relacionado con la dispersión de partículas y con la calidad del compuesto [1-3]. En estudios CFD

de tanques agitados, el refinamiento cerca del impulsor, la selección del modelo turbulento y el tratamiento del movimiento rotatorio son determinantes para obtener tendencias confiables [6,8,10,11]. En ese marco, los resultados de este trabajo indican que A1 transfiere más cantidad de movimiento al baño, mientras que A2 y A3 reducen la demanda de torque a costa de una menor velocidad promedio.

Tabla 3. Desempeño relativo de los impulsores a 600 rpm.

Impulsor	Velocidad promedio relativa a A1 [%]	Velocidad máxima relativa a A1 [%]	Torque relativo a A1 [%]	Interpretación
A1 - aspas rectas	100.0	100.0	100.0	Referencia de mayor renovación global.
A2 - aspas 30°	42.0	89.4	68.2	Desempeño intermedio con menor demanda mecánica.
A3 - aspas 60°	32.7	98.5	39.4	Menor velocidad promedio con torque reducido.

Tabla 4. Observaciones cualitativas por geometría de impulsor.

Geometría	Observación principal	Implicación hidrodinámica
A1 - aspas rectas	Mayor velocidad promedio y mayor torque en todas las rpm.	Mayor renovación global del baño y mayor demanda mecánica.
A2 - aspas 30°	Desempeño intermedio en velocidad promedio y torque.	Alternativa para reducir demanda mecánica con menor intensidad de mezclado.
A3 - aspas 60°	Velocidad máxima local cercana a A1, pero velocidad promedio menor.	Posible concentración local de energía con menor renovación global.

La Tabla 3 sintetiza el desempeño relativo a 600 rpm. A1 se toma como referencia por presentar la mayor velocidad promedio. A2 conserva 42.0% de la velocidad promedio de A1, mientras que A3 conserva 32.7%. En torque, A2 demanda 68.2% del torque de A1 y A3 demanda 39.4%. Esta comparación sugiere que A2 puede ser una alternativa intermedia cuando se busque moderar la demanda mecánica, aunque con menor intensidad de mezclado. A3 ofrece menor torque, pero su menor velocidad promedio puede favorecer regiones con baja renovación.

Tabla 5. Variables auxiliares recomendadas para fortalecer la discusión hidrodinámica en una versión posterior.

Variable complementaria	Utilidad para la discusión
Fracción de volumen con $u < 0.05$ m/s	Cuantificar regiones de baja renovación.
Índice de uniformidad de velocidad	Comparar la homogeneidad del campo de flujo entre geometrías.

Variable complementaria	Utilidad para la discusión
Número de potencia o potencia de mezclado	Relacionar torque, rpm y eficiencia energética.
Líneas de corriente completas	Identificar rutas de recirculación y cortocircuitos de flujo.
Validación con fluido modelo	Contrastar tendencias CFD mediante visualización experimental.

Las variables complementarias propuestas en la Tabla 5 permitirán fortalecer la discusión en una versión posterior del artículo. En particular, la fracción de volumen con baja velocidad, el índice de uniformidad de velocidad, el número de potencia y la comparación de líneas de corriente completas permitirán pasar de una interpretación visual a una evaluación cuantitativa de zonas de baja renovación y recirculación.

Análisis térmico del baño para el impulsor A1 de aspas rectas

La Figura 6 muestra la distribución de temperatura del aluminio A380 líquido para el impulsor A1 de aspas rectas bajo condiciones de agitación de 300, 450 y 600 rpm. En los tres casos, el volumen principal del baño permanece próximo al límite superior de la escala térmica, lo que indica una distribución globalmente homogénea. La Tabla 6 resume los valores mínimos, máximos y el intervalo térmico calculado para cada velocidad de rotación.

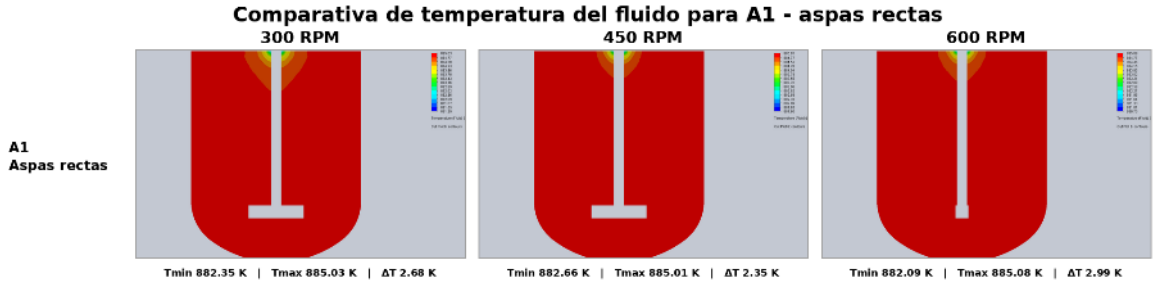


Figura 6. Comparativa del campo de temperatura del fluido para el impulsor A1 de aspas rectas a 300, 450 y 600 RPM. Las simulaciones corresponden al modelo térmico conjugado considerando aluminio A380 líquido como fluido de trabajo.

Tabla 6. Temperatura mínima, máxima e intervalo térmico del aluminio A380 líquido para el impulsor A1 de aspas rectas.

Velocidad de rotación	Tmin [K]	Tmax [K]	ΔT [K]
300 RPM	882.35	885.03	2.68
450 RPM	882.66	885.01	2.35
600 RPM	882.09	885.08	2.99

Los intervalos térmicos fueron reducidos en las tres condiciones: 2.68 K a 300 rpm, 2.35 K a 450 rpm y 2.99 K a 600 rpm. El caso de 450 rpm presentó el menor intervalo térmico, lo que sugiere una condición ligeramente más uniforme dentro del intervalo evaluado. En contraste, el caso de 600 rpm mostró el mayor ΔT debido a una temperatura mínima menor localizada en la región superior cercana al eje del agitador. Este comportamiento indica que, para el sistema A1, el incremento de la velocidad de rotación no redujo de forma monotónica el gradiente térmico global.

Desde el punto de vista hidrodinámico-térmico, la baja variación de temperatura es consistente con el papel de la agitación mecánica en la redistribución de energía dentro de recipientes agitados. Los estudios CFD en tanques agitados indican que la estructura de recirculación, la turbulencia generada por el impulsor y los vórtices de estela gobiernan la dispersión y la uniformidad del mezclado [6,9]. Por ello, el campo térmico debe interpretarse junto con los patrones de velocidad, el torque y la extensión de las regiones de baja renovación, y no únicamente mediante los valores extremos de temperatura.

En términos del proceso stir casting, los resultados térmicos para A1 son favorables porque muestran que el baño de aluminio A380 se mantiene cercano a una condición cuasi-isotérmica, con ΔT menor a 3 K en las tres velocidades analizadas. No obstante, la localización de la zona de menor temperatura cerca de la región superior del eje sugiere que una versión posterior del modelo debe cuantificar el volumen por debajo de un umbral térmico, por ejemplo $T < 883$ K, e incorporar la comparación térmica de los impulsores A2 y A3 para cerrar la evaluación termo-hidrodinámica del sistema.

CONCLUSIONES

La simulación CFD permitió comparar el efecto de la geometría del impulsor y de la velocidad de rotación sobre el campo de velocidades en un crisol troncocónico de laboratorio representativo de procesos stir casting de aleaciones de aluminio.

El impulsor A1 de aspas rectas presentó el mejor desempeño hidrodinámico global, debido a que generó las mayores velocidades promedio en 300, 450 y 600 rpm. A 600 rpm alcanzó 0.360 m/s de velocidad promedio, superando a A2 y A3 en 2.38 y 3.05 veces, respectivamente.

El incremento de la velocidad de rotación aumentó la velocidad promedio, la velocidad máxima y la magnitud del torque en todas las geometrías evaluadas. Este efecto confirma que la selección de rpm debe considerar tanto la intensidad de mezclado como la demanda mecánica del sistema.

La velocidad máxima no fue suficiente para identificar la mejor configuración de mezclado. A3 alcanzó una velocidad máxima cercana a la de A1 a 600 rpm, pero su velocidad promedio fue menor. Por ello, la evaluación hidrodinámica debe integrar indicadores globales y locales.

Para el proceso stir casting, el uso de A1 puede favorecer la renovación del baño y reducir la probabilidad de regiones con baja velocidad. Su mayor torque indica mayor requerimiento de energía mecánica, por lo que su implementación debe balancearse con estabilidad del baño, incorporación de partículas y riesgo de atrapamiento de gas.

El análisis térmico conjugado aplicado al impulsor A1 mostró una distribución térmica casi uniforme del aluminio A380 líquido, con intervalos de temperatura entre 2.35 y 2.99 K. La condición de 450 rpm presentó el menor ΔT, aunque la diferencia entre velocidades fue reducida; por ello, este resultado debe interpretarse como una ligera mejora térmica y no como un criterio único de selección operativa.

Como limitación, el análisis hidrodinámico comparativo entre impulsores se realizó bajo formulación isotérmica, mientras que el análisis térmico conjugado se aplicó únicamente al impulsor A1. Como trabajo futuro se recomienda realizar independencia de malla, validar los patrones de flujo con un fluido modelo, cuantificar regiones de baja velocidad y temperatura, y extender el modelo hacia suspensiones con partículas cerámicas para representar con mayor fidelidad el proceso stir casting.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. Muhammad and S. Jalal, “A Comparative Study of the Impact of the Stirrer Design in the Stir Casting Route to Produce Metal Matrix Composites,” Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2021, Article ID 4311743, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/4311743

2. F. Muhammad and S. Jalal, “Study the effect of stirrer design on the stirring performance of ceramic particle reinforcements in stir casting of Aluminum Matrix Composites,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 42, 1-2, 2022, pp. 51-64. https://doi.org/10.1177/07316844221101579

3. F. Muhammad and S. Jalal, “An overview of the effect of stirrer design on the mechanical properties of Aluminium Alloy Matrix Composites fabricated by stir casting,” Zanco Journal of Pure and Applied Sciences, Vol. 34, 1, 2022. https://doi.org/10.21271/zjpas.34.1.3

4. M. T. Sijo, K. R. Jayadevan and S. Janardhanan, “Simulation of mushy state solidification in stir casting,” World Journal of Engineering, Vol. 15, 1, 2018, pp. 156-165. https://doi.org/10.1108/WJE-04-2017-0079

5. N. T. A. Othman, S. K. Kamarudin and M. S. Takriff, “Optimization of a Continuous Hybrid Impeller Mixer via Computational Fluid Dynamics,” The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 619474, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/619474

6. H. Caillet, A. Bastide and L. Adelard, “CFD Simulations in Mechanically Stirred Tank and Flow Field Analysis: Application to the Wastewater (Sugarcane Vinasse) Anaerobic Digestion,” IntechOpen, 2021. https://doi.org/10.5772/intechopen.93926

7. D. E. Alnak, F. Koca and Y. Alnak, “Numerical Investigation of The Effect of Impeller Blade Angle for Stirred Tank,” Sakarya University Journal of Science, Vol. 26, 2, 2022, pp. 397-409. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.992396

8. J. Fang, X. Ling and Z. F. Sang, “Solid Suspension in Stirred Tank Equipped with Multi-Side-Entering Agitators,” Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 7, 2, 2013, pp. 282-294. https://doi.org/10.1080/19942060.2013.11015471

9. Y. Lu, Z. Zhu and X. Qi, “The Process of the Intensification of Coal Fly Ash Flotation Using a Stirred Tank,” Minerals, Vol. 8, 12, 2018, 597. https://doi.org/10.3390/min8120597

10. A. D. De La Concha-Gómez, J. Ramírez-Muñoz and V. E. Márquez-Baños, “Effect of the Rotating Reference Frame Size for Simulating a Mixing Straight-Blade Impeller in a Baffled Stirred Tank,” Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 18, 3, 2018, pp. 1143-1160. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n3/delaconcha

11. S. Salmat, D. Y. Sari and Y. Fernanda, “SolidWorks Flow Simulation: Selecting the optimal mesh for conducting CFD analysis on a centrifugal fan,” Journal of Engineering Researcher and Lecturer, Vol. 2, 3, 2023, pp. 94-103. https://doi.org/10.58712/jerel.v2i3.104

12. M. F. Aldio, W. Waskito and P. Purwantono, “Optimization of impeller blade number in centrifugal pump for crude oil using SolidWorks Flow Simulation,” Journal of Engineering Researcher and Lecturer, Vol. 2, 3, 2023, pp. 80-93. https://doi.org/10.58712/jerel.v2i3.116

13. V. Yakhot and L. M. Smith, “The Renormalization Group, the ε-Expansion and Derivation of Turbulence Models,” Journal of Scientific Computing, Vol. 7, 1, 1992, pp. 35-61. https://doi.org/10.1007/BF01060210

14. E. Bentham, P. J. Heggs and T. Mahmud, “CFD Modelling of Conjugate Heat Transfer in a Pilot-Scale Unbaffled Stirred Tank Reactor with a Plain Jacket,” The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 97, 2, 2019, pp. 573-585. https://doi.org/10.1002/cjce.23360

EDITORAS

Gloria Verónica Vázquez García
Amalia Martínez García
Cristina E. Solano Sosa
María del Socorro Hernández Montes
Laura Elena Rosales Zárate
María Eugenia Sánchez Morales
Alexandra Monsetrrat García

9 786078 821679

ISBN TOMO II
BIOTECNOLOGÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

9 786078 821655

ISBN OBRA COMPLETA
AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN MÉXICO III

Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.