
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 IV
FÍSICO MATEMÁTICAS Y CIENCIAS DE LA TIERRA

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

Físico Matemáticas y Ciencias de la Tierra ISBN 978-607-8821-693
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

MANIPULACIÓN Y POSICIONAMIENTO DE MARCADORES FLUORESCENTES CON CAMPO EVANESCENTE EN FIBRA TAPER PARA ESTUDIOS CELULARES 4

EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA SERS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA DE CONSUMO HUMANO 16

PRODUCCIÓN DEL QUARK TOP PESADO T MEDIANTE EL PROCESO $\mu + \mu - \rightarrow V \rightarrow TT$ EN EL MARCO DEL MODELO BESTEST LITTLE HIGGS 26

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA NO-POTABLE EN LABORATORIO APLICANDO ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD: RESULTADOS PRELIMINARES 31

COMPORTAMIENTO DINÁMICO ACOPLADO DE CUATRO PLACAS FLEXIBLES EN FLUJO DE AIRE CON DISPOSICIÓN EN TANDEM 38

FORMACIÓN DE CENTROS N–V–N EN NANODIAMANTES FLUORESCENTES MEDIANTE OZONIZACIÓN Y ULTRASONIDO: OPTIMIZACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL Y ESTABILIDAD COLOIDAL 47

DESARROLLO DE UN SIMULADOR INTERACTIVO EN PYTHON PARA LA ENSEÑANZA DE LOS CONCEPTOS EN REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ 56

VALORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DE UN SISTEMA DE IRRADIACIÓN DE RAYOS X BASADO EN EL GENERADOR PIROELÉCTRICO COOLX MEDIANTE MCNPX 61

CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN EL MUNICIPIO DE MISANTLA VERACRUZ Y LA REGIÓN NAUTLA 68

MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA DEMOSTRACION DE LA AERODINÁMICA BAJO EL PRINCIPIO DE BERNOULLI 77

ESTUDIO INTEGRAL DE LA SUBSIDENCIA EN VILLAS DEL PEDREGAL MORELIA, MICHOACÁN 81

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT EQUILIBRISTA SOBRE UNA ESFERA CONTROLADO POR UN REGULADOR LINEAL CUADRÁTICO 95

CÁLCULO DEL MOMENTO MAGNÉTICO ANÓMALO DÉBIL DEL QUARK TOP EN EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS 105

INTERFERÓMETRO HOLOGRÁFICO DIGITAL QUE EMPLEA SECUENCIALMENTE TRES DIRECCIONES DE ILUMINACIÓN USADO PARA OBTENER PARÁMETROS MECÁNICOS EN TEJIDO BIOLÓGICO 110

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR ELÉCTRICO POR SIMULACIÓN DE FLUIDOS Y ALGORITMOS DEEP LEARNING DE FÍSICA INFORMADA 117

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ PARA ADQUISICIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE HOLOGRAMAS DIGITALES EN TIEMPO REAL 130

SÍNTESIS SOSTENIBLE DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO FLUORESCENTES PARA BIOIMAGEN 141

DEMODULACIÓN POLARIMÉTRICA DE LA MATRIZ DE MUELLER BASADA EN EL DOMINIO DE FOURIER COMPLEJO 151

MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL CELULAR MEDIANTE MICROSCOPÍA DE IMÁGENES SENSIBLES A LA POLARIZACIÓN 159

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE UN SIMULADOR DE PULSOS CARDÍACOS PARA ESTUDIO DE SEÑALES FOTOPLETISMOGRÁFICAS (PPG) 164

OPTIMIZACIÓN METODOLÓGICA DE LA LST Y UHI CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES 173

MEDICIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL EFECTIVA DE SISTEMAS ÓPTICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE GAUSS 180

NANOPARTÍCULAS DE PLATA DE DIFERENTES MORFOLOGÍAS INDUCIDAS POR FOTOREDUCCIÓN 186

NÚMEROS DIFUSOS EN PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV 194

ANÁLISIS DE LA PRECIPITAÓN EN EL CORREDOR MORELIA - PATZCUARO 200

ESTUDIO EN CAFÉS MEXICANOS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA RAMAN-SERS 208

ESTUDIO IN SILICO DEL C_{60} FUNCIONALIZADO CON C_{60} $(ARG)_8$ Y $C_{60}(GLY)_4$: PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA ESTRUCTURA ELECTRÓNICA 218

EFECTO DE LAS CADENAS LATERALES Y DEL NÚCLEO CONJUGADO SOBRE LAS PROPIEDADES ELECTRÓNICAS DE ACEPTORES NO FULERENOS BASADOS EN QUINOXALINA: QX-1, QX-2, QX-BO-1, QX-BO-2 Y QX-BO-3 225

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ESTRUCTURAL DE ZAPATAS CORRIDAS EN VIVIENDA UNIFAMILIAR MEDIANTE IA Y PROGRAMACIÓN DE CÁLCULO AUTOMATIZADO 233

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DEFORMACIÓN EN ACERO 1045 POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA DE MOTEADO 240

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS COMO HABILITADOR DE EFICIENCIA OPERATIVA Y TRAZABILIDAD LOGÍSTICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN 248

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA IOT PARA POLARIMETRÍA POR REFLEXIÓN CON LUZ NATURAL 254

PROCESAMIENTO AUTOMATIZADO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA DETECCIÓN DE SOBRECARGAS MUSCULARES EN CICLISTAS 262

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y VIDEO CIENTÍFICO EN UNA COMPUTADORA DE UNA SOLA PLACA 272

EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DE LA PRESA EL BOSQUE, DEL SISTEMA CUTZAMALA 280

SIMULACIÓN BASADA EN COMSOL DE UN SENSOR INTERFEROMÉTRICO DE FIBRA ÓPTICA 287

ANÁLISIS MOLECULAR DE TEQUILAS POR TÉCNICA SERS 294

CUANTIFICACIÓN ÓPTICA DE MICROPLÁSTICOS MEDIANTE UMBRALES TÉRMICOS INDUCIDOS POR LÁSER PULSADO 306

EVALUACIÓN ÓPTICA DE LA FOTODEGRADACIÓN EN MICROPLÁSTICOS 312

ANÁLISIS NUMÉRICO DE SISTEMAS PERIÓDICOS QUE INCLUYEN MATERIALES SEMICONDUCTORES 319

ACOPLAMIENTO LEPTÓNICO DE UN NUEVO BOSÓN Z' EN EL CONTEXTO DEL MODELO B-L 328

POLARIMETRÍA DE STOKES BASADA EN MODULACIÓN ELECTRÓNICA MEDIANTE RETARDADORES DE CRISTAL LÍQUIDO 333

OLEDS CON EMISIÓN AZUL PROFUNDO MEDIANTE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA TIPO FRET Y FABRICADOS POR MÉTODOS HÚMEDOS 338

TRANSICIÓN ESTABLE-INTERMITENTE EN UN LÁSER F8 DE TULIO CON PI-NOLM EN RÉGIMEN MODE-LOCKED CON MODULACIÓN Q-SWITCHED 347

METODOLOGÍA 4MAT PARA EL DISEÑO DE SECUENCIAS DE APRENDIZAJE ADAPTATIVO PARA UN CURSO DE FÍSICA INTRODUCTORIA 355

DISEÑO DE UN INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN PARA EXPERIMENTOS CIENTÍFICOS EN EL NIVEL PREESCOLAR 364

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN LÁSER DE FIBRA DE AMARRE DE MODOS PASIVO: APROXIMACIÓN ESCALAR 372

MICRODATOS, JSON-LD, RDFA: ESTADISTICAS DE SU USO POR WEB DATA COMMONS 382

SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DEL SRSB2O6 DOPADO CON ITRIO 387

MODELADO DE LA SOBREPRESIÓN DE ONDAS DE CHOQUE PRODUCIDAS POR AIRBURSTS ATMOSFÉRICOS: UN ENFOQUE DE DEPOSICIÓN CONTINUA DE ENERGÍA APLICADO A LA EVALUACIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL 398

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE HUESO FEMORAL DE ACUERDO AL MEDIO DE CONSERVACIÓN 405

LAS TOLVANERAS DEL LAGO DE CUITZEO, MICHOACÁN: ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y SOCIAL 415

EFECTO DE LOS PROTOCOLOS DE DESCELULARIZACIÓN EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y FUNCIONALES DE ANDAMIOS DE MEMBRANA AMNIÓTICA DESCELULARIZADA 427

ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEJORADO DE AEROGELES DE TiO_2-SiO_2 MEDIANTE ESPECTROSCOPIA RAMAN POLARIZADA 436

LENTES DE FRESNEL ELECTRÓNICAS EN PANTALLA DE CRISTAL LIQUIDO 445

PLANEACIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MINICÁMARA DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN IONIZANTE 452

EFECTO DEL ESCAPE DE FOTONES IONIZANTES EN DIAGNÓSTICOS DE REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR CON MODELOS 3D 457

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL ROBUSTA MEDIANTE FUSIÓN DE GEOMETRÍA ESTÉREO Y SEÑALES POLARIMÉTRICAS 465

MONITOREO DE EFICIENCIA DE PLACAS CON GRAFENO OXIDADO PARA PRUEBAS DE PROTEÍNAS CLÍNICAMENTE RELEVANTES 472

CLASIFICACIÓN DE EXOPLANETAS MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL POR PARTES: UN ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RELACIÓN MASA-RADIO 478

DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD EN UN SISTEMA DE MOVIMIENTO CIRCULAR CON RADIO VARIABLE MEDIANTE ADQUISICIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL 488

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA PLACA FLEXIBLE INMERSA EN UN FLUJO DE AIRE AXIAL 495

DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN ESPECTRÓMETRO VIS-NIR PARA SU USO EN DOCENCIA 504

INTERFEROMETRIA DE DESPLAZAMIENTO LATERAL CON ILUMINACION POLICROMATICA PARA LA RECUPERACIÓN DEL GRADIENTE DE FASE 517

SÍNTESIS POR EL MÉTODO PECHINI Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA PEROVSKITA $SRZRO_3$ 526

DETECCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS FÍSICOS Δx EN UN INTERFERÓMETRO DE MICHELSON MEDIANTE LA POSICIÓN DE CEROS EN EL PLANO COMPLEJO S 536

BÚSQUEDA DE UN CANDIDATO DE MATERIA OSCURA LIGERA MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR 544

MANIPULACIÓN Y POSICIONAMIENTO DE MARCADORES FLUORESCENTES CON CAMPO EVANESCENTE EN FIBRA TAPER PARA ESTUDIOS CELULARES

Hilario Martines-Arano[1]*, Lizeth Martínez-Ayala[1], Jhovani Enrique Bornacelli-Camargo[1], Agustín Hernández-Rendón[2], Alinne Michelle Sánchez-Tomay[2], María del Rocío Aparicio-Méndez[2], Ingrid Aylin Isidoro-Cruz[3]

[1] Escuela Superior Tepeji del Río, Ingeniería Industrial. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [2] Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, [3] Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji.
hilario_martines@uaeh.edu.mx

RESUMEN

El posicionamiento localizado de marcadores fluorescentes en células vivas, sin contacto mecánico, es clave para estudiar procesos dinámicos como adhesión, migración e interacción célula–nanomaterial con mínima perturbación. En este trabajo se plantea y valida, mediante modelado y análisis cualitativo de desempeño, un esquema óptico basado en el campo evanescente generado por una fibra óptica elongada (taper) para capturar y conducir nanopartículas funcionalizadas hacia regiones específicas de la membrana celular, con énfasis en células de adenocarcinoma gástrico (AGS). Se considera una fibra taper con reducción geométrica progresiva hasta escala submicrométrica/nanométrica, lo que incrementa la fracción de campo fuera de la guía y concentra la interacción luz–materia cerca de la zona adelgazada. Se integran nanopartículas de oro funcionalizadas con un fluoróforo (p. ej., rodamina B) y un montaje experimental compatible con microscopía de fluorescencia, donde el láser acoplado a la fibra excita el marcador y, simultáneamente, produce fuerzas ópticas. Con base en simulaciones, la intensidad del campo evanescente crece marcadamente hacia la punta del taper y decae exponencialmente con la distancia radial, generando una fuerza de gradiente dominante que favorece el atrapamiento estable contra el movimiento browniano, mientras que la fuerza de dispersión contribuye al desplazamiento longitudinal controlado una vez capturada la nanopartícula. Estos resultados sustentan la factibilidad de sugerir marcadores fluorescentes a sitios definidos, preservando la integridad celular al evitar contacto directo y limitar efectos térmicos por control de potencia y geometría.

En conjunto, el enfoque confirma que la micro/nano-ingeniería de la fibra taper permite un control espacial fino del campo evanescente y habilita una plataforma no invasiva para posicionamiento de marcadores y observación localizada en tiempo real, con potencial de escalamiento hacia diagnóstico óptico y estudios especializados en biología celular.

Palabras clave: fibra *taper*; campo evanescente; nanopartículas de oro; rodamina B; células AGS; fuerzas ópticas; fluorescencia.

INTRODUCCIÓN

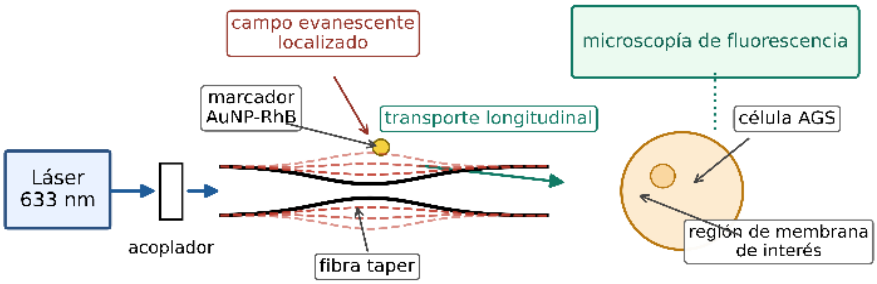
La manipulación óptica de partículas y biomarcadores ha avanzado de manera importante en las últimas décadas. Inicialmente, gran parte de estos estudios se basaban en pinzas ópticas formadas con objetivos de alta apertura numérica; sin embargo, actualmente existe un interés creciente en desarrollar plataformas más compactas, integradas y compatibles con ambientes biológicos. El principio físico que permite este tipo de manipulación es la transferencia de momento desde el campo electromagnético hacia la partícula. Cuando predomina el gradiente de intensidad, la partícula tiende a desplazarse hacia la región donde el campo óptico es más intenso. Por otro lado, cuando la presión de radiación se vuelve significativa, aparece una componente de fuerza en la dirección de propagación de la luz, capaz de empujar o conducir la partícula. En este sentido, los trabajos pioneros de Ashkin y colaboradores sentaron las bases del atrapamiento óptico, primero en partículas dieléctricas y posteriormente en células vivas, utilizando condiciones de irradiación que reducen el daño óptico [2,3].

Dentro de este panorama, una fibra óptica taper representa una alternativa especialmente atractiva. A diferencia de una fibra convencional, el adelgazamiento progresivo de la guía permite que una parte del modo óptico se extienda hacia el medio externo. Esta porción del campo no se comporta como una onda que se propaga libremente, sino como un campo evanescente que disminuye rápidamente al alejarse de la superficie de la fibra. Gracias a este comportamiento, la interacción luz–materia queda confinada a una región muy cercana al taper, lo que resulta conveniente para manipular partículas o marcadores en las proximidades de superficies biológicas sin establecer contacto mecánico directo [1,5–8].

En el sistema propuesto se consideran nanopartículas de oro funcionalizadas con un fluoróforo tipo rodamina B. Esta combinación es adecuada porque el oro ofrece una superficie químicamente estable y fácilmente funcionalizable, mientras que la rodamina proporciona una señal fluorescente intensa y útil para observación por microscopía. Existen reportes previos sobre nanopartículas de oro modificadas con rodamina o compuestos similares para aplicaciones de detección e imagen [13,14]. Sin embargo, también debe considerarse que las nanopartículas de oro pueden absorber luz visible con eficiencia, por lo que el calentamiento local es un aspecto que debe evaluarse cuidadosamente.

Como modelo biológico se propone el uso de células AGS, una línea epitelial humana de adenocarcinoma gástrico descrita originalmente por Barranco y colaboradores y actualmente distribuida por ATCC como CRL-1739 [18,19]. Esta línea celular se toma como caso de estudio para analizar la posibilidad de dirigir marcadores fluorescentes hacia regiones específicas de la membrana celular. Es importante señalar que el presente trabajo se enfoca en la factibilidad física y el diseño metodológico del sistema. Por ello, las simulaciones se utilizan para estimar escalas de potencia, distancia y fuerza, así como para identificar los parámetros que deberán controlarse antes de realizar una validación experimental con células vivas.

La Figura 1 resume de manera general el funcionamiento de la plataforma propuesta. La fibra taper cumple varias funciones al mismo tiempo: guía la luz, genera el campo evanescente y actúa como elemento de posicionamiento local. Al reducirse el diámetro de la fibra, una mayor fracción del modo guiado se extiende hacia el medio circundante, formando una zona de interacción óptica muy cercana a la superficie. En esta región, un marcador fluorescente funcionalizado puede experimentar fuerzas ópticas suficientes para aproximarse a la fibra y desplazarse hacia una zona específica de la membrana celular.



La fibra taper guía la luz y expone un campo evanescente capaz de capturar y dirigir marcadores fluorescentes hacia regiones específicas de la membrana celular sin contacto mecánico directo.

Figura 1. Esquema conceptual del montaje óptico propuesto para la manipulación localizada de marcadores fluorescentes mediante una fibra óptica taper. El láser acoplado a la fibra genera un campo evanescente en la región adelgazada, el cual permite capturar un marcador AuNP-RhB y favorecer su transporte longitudinal hacia una región específica de la membrana de una célula AGS. La microscopía de fluorescencia permite visualizar la posición del marcador y evaluar su interacción local con la célula sin contacto mecánico directo.

FUNDAMENTO TEÓRICO

CONFINAMIENTO MODAL Y CAMPO EVANESCENTE

Para una guía de índice escalón, la frecuencia normalizada o número V constituye una medida básica del confinamiento modal [9,10]. En una fibra *taper* puede escribirse, en función del radio local $a(z)$, como:

$$V(z) = \frac{2\pi a(z)}{\lambda}\sqrt{n_f^2 - n_m^2} \tag{1}$$

donde λ es la longitud de onda en el vacío, n_f el índice de refracción de la fibra y n_m el índice del medio circundante. A medida que el radio local disminuye, V también decrece y el modo guiado se deslocaliza progresivamente. Como consecuencia, la intensidad del campo en el exterior de la fibra se vuelve no despreciable.

La intensidad evanescente puede aproximarse, para fines de diseño, como un decaimiento exponencial con la distancia radial d medida desde la superficie [9,10]:

$$I(z,d) = I_s(z)\exp\left[-\frac{2d}{d_p(z)}\right] \tag{2}$$

$$d_p(z) = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_{\text{eff}}^2(z) - n_m^2}} \tag{3}$$

Aquí $I_s(z)$ es la intensidad superficial, $d_p(z)$ la profundidad de penetración y $n_{\text{eff}}(z)$ un índice efectivo local del modo guiado. Las ecuaciones (2) y (3) son consistentes con la atenuación exponencial del campo evanescente derivada de la teoría de guías y de reflexión interna total.

La distribución simulada del campo evanescente en la Figura 2, permite visualizar cómo la geometría del *taper* modifica el confinamiento óptico. A medida que el radio local de la fibra disminuye, el modo guiado se extiende con mayor intensidad hacia el medio acuoso. Por ello, la región adelgazada representa la zona más favorable para generar fuerzas ópticas sobre nanopartículas cercanas a la superficie.

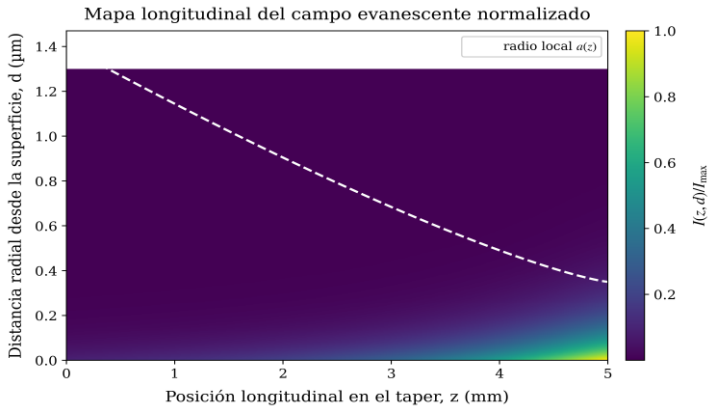


Figura 2. Mapa longitudinal del campo evanescente normalizado generado alrededor de la fibra óptica taper. La intensidad relativa aumenta hacia la región adelgazada de la fibra debido a la reducción del confinamiento modal, mientras que el campo decae exponencialmente al alejarse radialmente de la superficie. Esta distribución confirma que la interacción óptica útil se concentra en una zona submicrométrica cercana al taper.

Además de la distribución longitudinal, resulta útil observar la sección transversal del campo alrededor de la fibra. Esta representación puede ser apreciada en la Figura 3, esta permite identificar con mayor claridad la zona de máximo confinamiento y la región externa donde aparece la cola evanescente. En términos físicos, el campo no se distribuye de manera uniforme en todo el medio, sino que permanece localizado alrededor de la superficie de la guía, lo cual explica la naturaleza de corto alcance de la manipulación óptica propuesta.

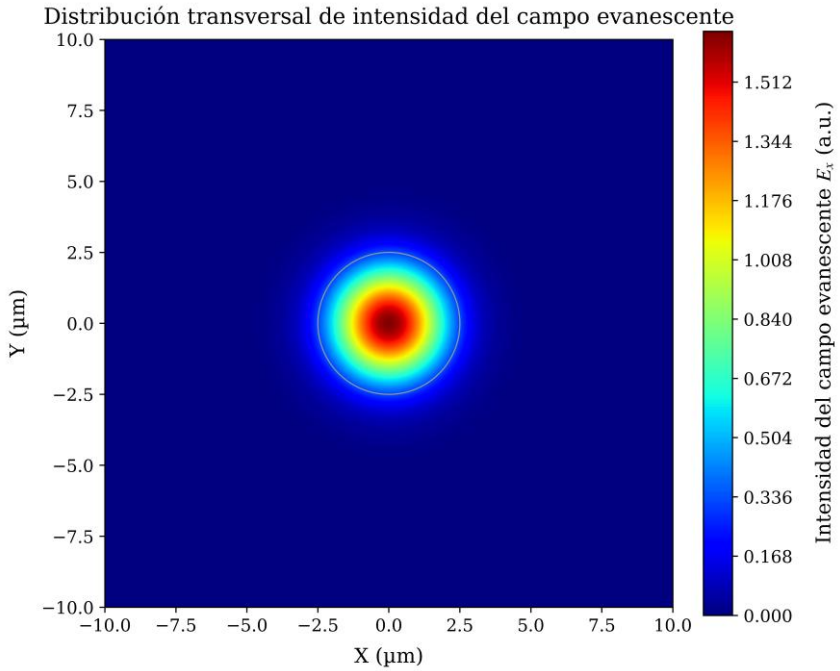


Figura 3. Distribución transversal de intensidad del campo evanescente alrededor de la fibra taper. La región central corresponde al campo fuertemente confinado en la guía, mientras que la intensidad externa representa la cola evanescente que penetra en el medio circundante. El decaimiento radial observado indica que la captura y posicionamiento de marcadores fluorescentes sólo son eficientes cuando las nanopartículas se encuentran suficientemente cerca de la superficie de la fibra.

La Figura 4 complementa la vista transversal del campo evanescente mediante una representación tridimensional de la intensidad alrededor de la fibra *taper*. Esta visualización permite observar que la intensidad no sólo decae radialmente, sino que también se distribuye alrededor del contorno de la guía, formando una región de campo cercano localizada. Desde el punto de vista físico, este comportamiento es fundamental para el posicionamiento de marcadores fluorescentes, ya que la nanopartícula sólo experimenta fuerzas ópticas significativas cuando se encuentra dentro de la zona donde el gradiente de intensidad es suficientemente alto.

La Figura 4 muestra que el campo evanescente tiene una intensidad máxima cerca de la superficie de la fibra y disminuye rápidamente conforme aumenta la distancia radial. Este comportamiento se debe a que el campo evanescente no se propaga libremente en el medio, sino que permanece ligado al modo óptico guiado por la fibra. Por ello, la interacción con nanopartículas ocurre principalmente en la zona cercana al taper, donde el gradiente de intensidad puede generar fuerzas ópticas suficientes para atraer, retener o desplazar el marcador fluorescente.

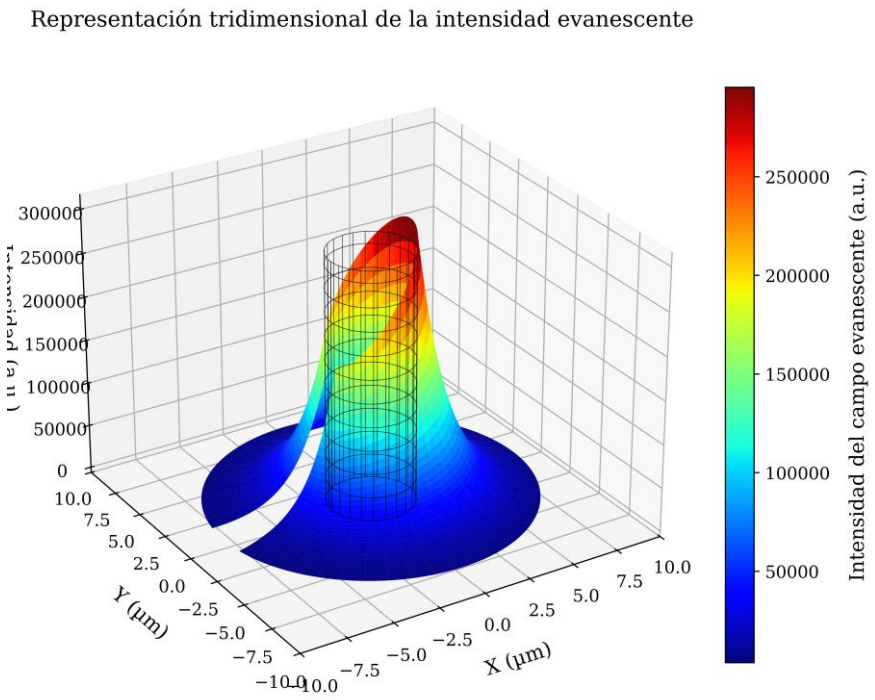


Figura 4. Representación tridimensional de la intensidad del campo evanescente alrededor de la fibra taper. La superficie muestra la distribución espacial del campo en la vecindad de la guía y su disminución progresiva al alejarse del contorno de la fibra. Esta configuración confirma que el efecto óptico útil se concentra en una región localizada, lo cual favorece la captura y el posicionamiento de marcadores fluorescentes cercanos a la superficie del taper.

FUERZAS ÓPTICAS, DIFUSIÓN BROWNIANA Y CALENTAMIENTO

En el régimen Rayleigh, cuando el marcador es mucho más pequeño que la longitud de onda, la nanopartícula puede aproximarse como un dipolo inducido. En unidades SI, la polarizabilidad de una esfera homogénea se expresa como [11]:

$$\alpha_p = 4\pi\varepsilon_0 n_m^2 R_p^3 \left(\frac{m^2-1}{m^2+2}\right) \tag{4}$$

donde R_p es el radio de la partícula y $m = n_p/n_m$ la razón de índices. La fuerza de gradiente puede escribirse, en su forma estándar, como [2,3,4,11]:

$$F_{\text{grad}} = \frac{\Re(\alpha_p)}{2n_m c\varepsilon_0}\nabla I \tag{5}$$

Mientras tanto, la presión de radiación o fuerza de dispersión puede representarse, de forma aproximada, por:

$$F_{\text{scat}} \approx \frac{n_m}{c} C_{\text{ext}} I\, \hat{z} \tag{6}$$

La estabilidad frente al ruido térmico se evalúa a partir del potencial óptico asociado al gradiente:

$$U(d) = -\frac{\Re(\alpha_p)}{2 n_m c \varepsilon_0} I(d) \tag{7}$$

En medio líquido, la agitación térmica se caracteriza por la relación de Stokes–Einstein y por el desplazamiento cuadrático medio browniano [16,17]:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R_p}, \qquad \text{RMS}(\Delta t) = \sqrt{2D\Delta t} \tag{8}$$

La dinámica sobreamortiguada de un marcador cerca del *taper* puede integrarse con un esquema tipo Euler–Maruyama de la ecuación de Langevin:

$$dx = \mu F(x)\, dt + \sqrt{2D\, dt}\, \xi(t), \qquad \mu = \frac{1}{6\pi\eta R_p} \tag{9}$$

Finalmente, para vigilar el posible calentamiento local por absorción del oro, puede emplearse la cota estacionaria:

$$\Delta T \approx \frac{C_{\text{abs}} I}{4\pi k_m R_p} \tag{10}$$

La ecuación (10) proviene del balance de conducción radial para una fuente esférica efectiva de potencia absorbida y proporciona una estimación conservadora del incremento térmico [12].

METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA

El análisis numérico se construyó con una fibra de sílice inmersa en medio acuoso, usando $\lambda = 633$ nm, $n_f = 1.45$ y $n_m = 1.33$. Se consideró un *taper* cuyo radio local disminuye de 1.40 µm a 0.35 µm a lo largo de 5 mm, con una transición suave para preservar el carácter adiabático. La fracción efectiva de potencia que interactúa en el exterior se fijó en 20 % como valor de diseño y no como medición cerrada.

El marcador se modeló como una nanopartícula funcionalizada con radio efectivo $R_p = 80$ nm y un índice óptico efectivo $n_p = 1.59$. En el caso del oro puro, una descripción más precisa requeriría polarizabilidad compleja basada en constantes ópticas tabuladas [15]; sin embargo, la aproximación usada aquí es adecuada para un estudio preliminar de escalas de fuerza y energía.

Las simulaciones incluyeron tres niveles de análisis: i) distribución geométrica del campo evanescente a lo largo y alrededor del *taper*; ii) estimación de energía potencial, fuerza de gradiente y dinámica browniana de captura; y iii) estimación del incremento térmico por absorción. El objetivo fue identificar ventanas de operación plausibles antes de realizar experimentos con partículas libres y, posteriormente, con células AGS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESCALA ESPACIAL DEL CAMPO EVANESCENTE

La Figura 5 muestra el decaimiento radial del campo para distintos radios locales del *taper*. Cuando el radio disminuye, el índice efectivo se aproxima al del medio y la profundidad de penetración d_p aumenta. Esto significa que una porción mayor del campo modal se extiende fuera de la fibra, lo que incrementa el alcance efectivo de la interacción óptica sin dejar de ser un fenómeno de campo cercano.

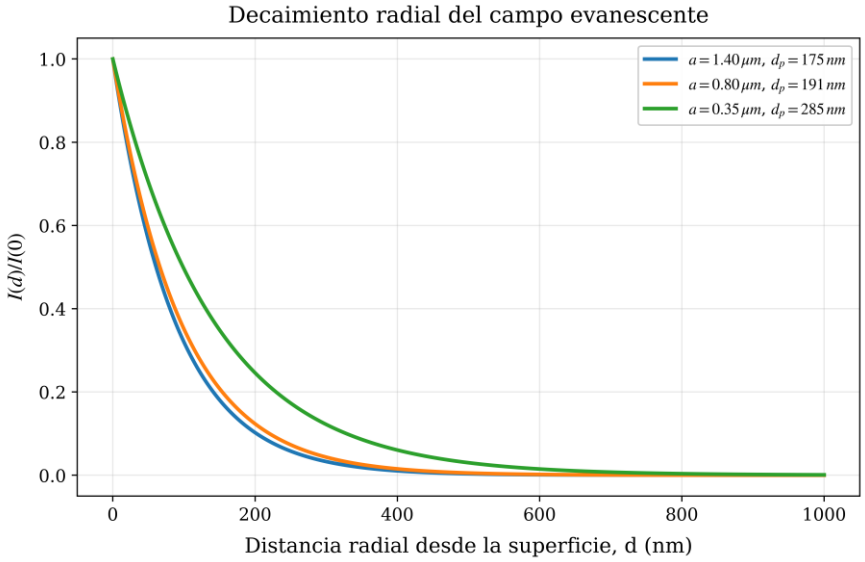


Figura 5. Decaimiento radial del campo evanescente para tres radios locales del taper. La curva correspondiente al radio más pequeño presenta una cola más extensa, lo cual confirma que la reducción geométrica favorece la interacción con partículas externas.

ESTABILIDAD MECÁNICA FRENTE A AGITACIÓN TÉRMICA

La Figura 6 compara la profundidad de trampa óptica con la escala térmica $k_B T$. Un criterio práctico ampliamente usado es buscar profundidades de varios $k_B T$ para compensar las fluctuaciones brownianas. En esta simulación, potencias bajas generan confinamiento débil, mientras potencias entre 20 y 40 mW producen pozos más profundos cerca de la superficie. No obstante, el confinamiento cae con rapidez a medida que d aumenta, lo que refuerza la necesidad de acercar el marcador a la vecindad del *taper*.

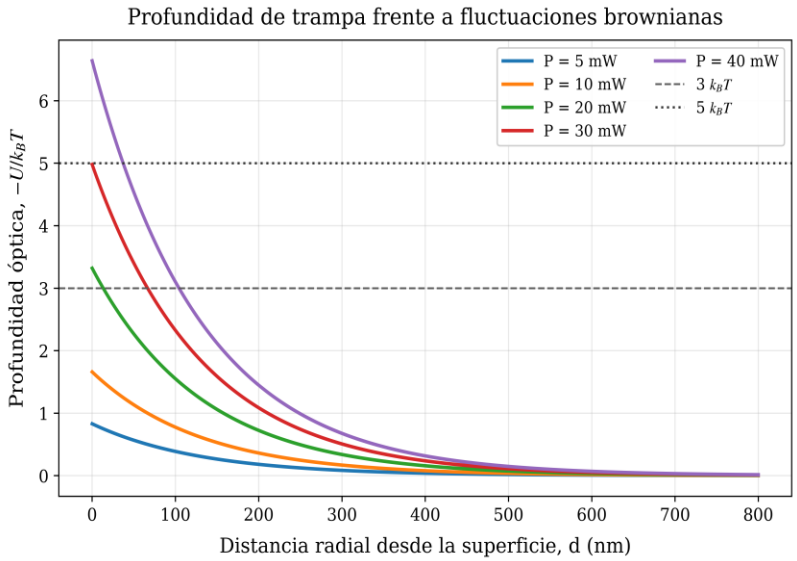


Figura 6. Profundidad del potencial óptico expresada en unidades k_BT. La captura estable requiere que la energía de trampa supere a las fluctuaciones térmicas brownianas en la región de interés.

La Figura 7 ilustra una trayectoria browniana sobreamortiguada con un término de arrastre radial hacia la superficie y un desplazamiento longitudinal inducido por la componente axial de la fuerza óptica. El resultado es coherente con el mecanismo físico buscado: primero se produce el acercamiento radial y, una vez lograda la captura, la partícula puede desplazarse a lo largo del *taper* hacia la región de interés.

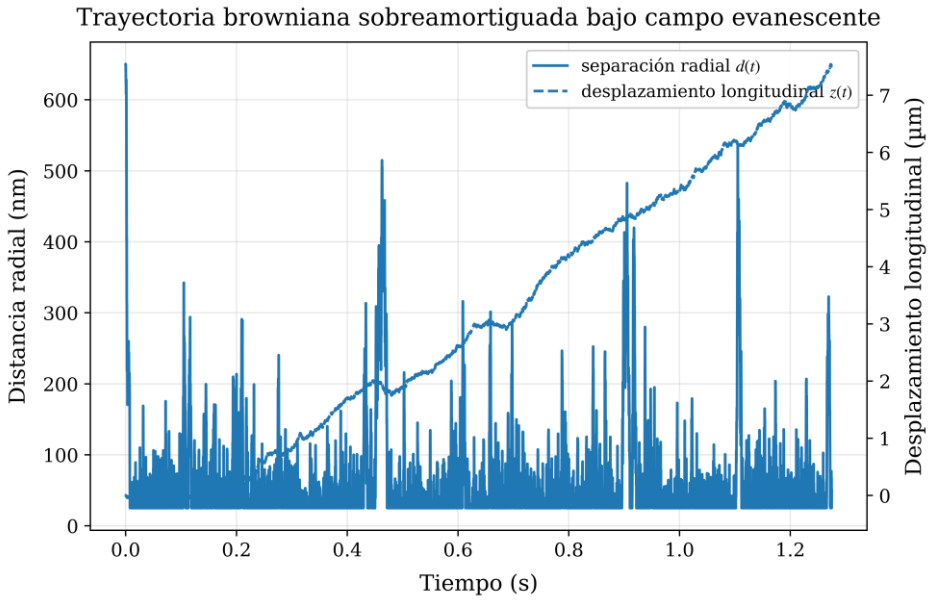


Figura 7. Trayectoria estocástica simulada para un marcador sometido a campo evanescente. La separación radial disminuye hasta estabilizarse cerca de la superficie, mientras el desplazamiento longitudinal aumenta de forma gradual.

FUERZA DE GRADIENTE Y PROBABILIDAD DE CAPTURA

La Figura 8 cuantifica la magnitud estimada de la fuerza de gradiente. La fuerza presenta su máximo en la vecindad inmediata de la superficie y decrece casi exponencialmente con la distancia. Esta es la razón física por la cual la plataforma actúa como una herramienta de posicionamiento localizado más que como una trampa de largo alcance.

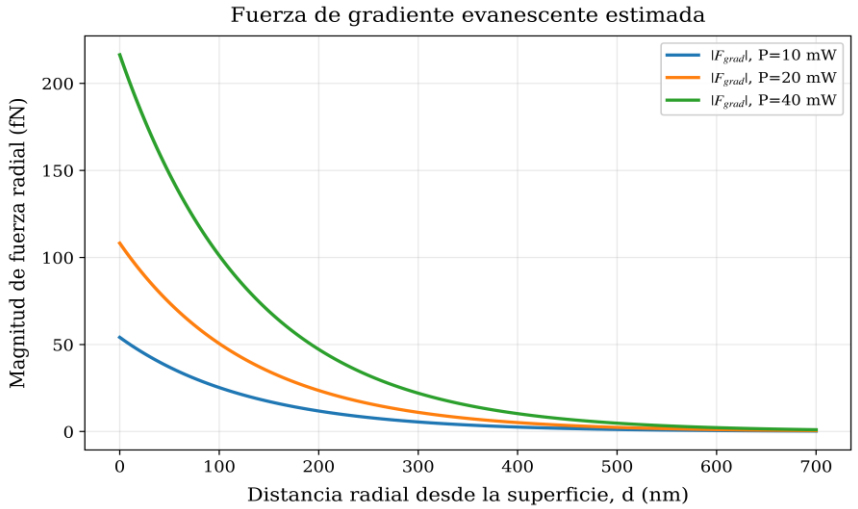


Figura 8. Magnitud estimada de la fuerza de gradiente para diferentes potencias guiadas. El carácter fuertemente localizado de la fuerza confirma la naturaleza de campo cercano del atrapamiento.

La Figura 9 resume el comportamiento global mediante una simulación Monte Carlo. Para distancias iniciales pequeñas y potencias moderadas, la fracción de trayectorias capturadas aumenta notablemente. En cambio, si la partícula inicia demasiado lejos del *taper*, el ruido térmico domina y la probabilidad de captura decrece. Este tipo de mapa es útil para seleccionar potencias iniciales de trabajo y para planear ensayos con partículas fluorescentes libres antes de avanzar a experimentos con células.

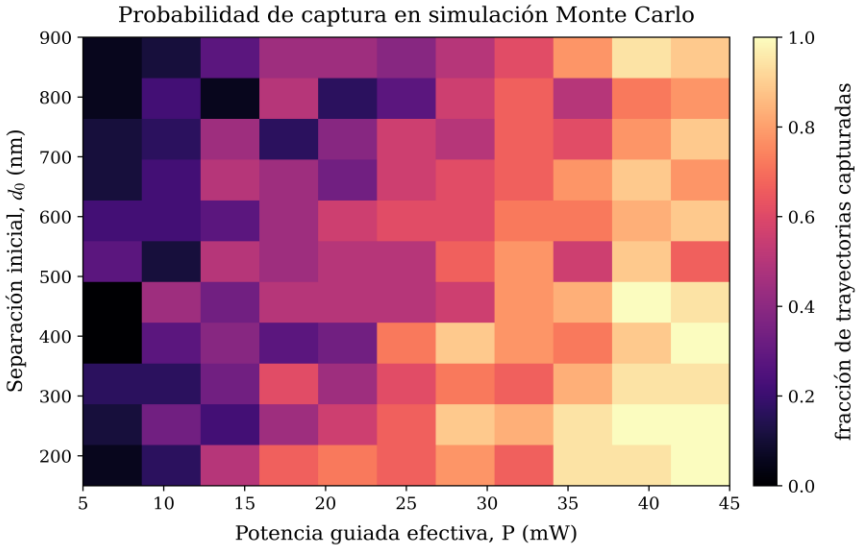


Figura 9. Probabilidad de captura obtenida por simulación Monte Carlo. La eficiencia del proceso depende simultáneamente de la potencia guiada y de la separación inicial entre el marcador y la superficie de la fibra.

CONSIDERACIONES FOTOTÉRMICAS Y RELEVANCIA BIOLÓGICA

La Figura 10 introduce una restricción esencial: la estabilidad óptica no garantiza bioseguridad térmica. Si la nanopartícula absorbe de forma importante, el incremento local de temperatura puede volverse significativo al aumentar la potencia. Por ello, la potencia óptica debe elegirse de manera conjunta con la longitud de onda, el tamaño y la química superficial del marcador, y debe validarse experimentalmente mediante termometría o ensayos de viabilidad celular.

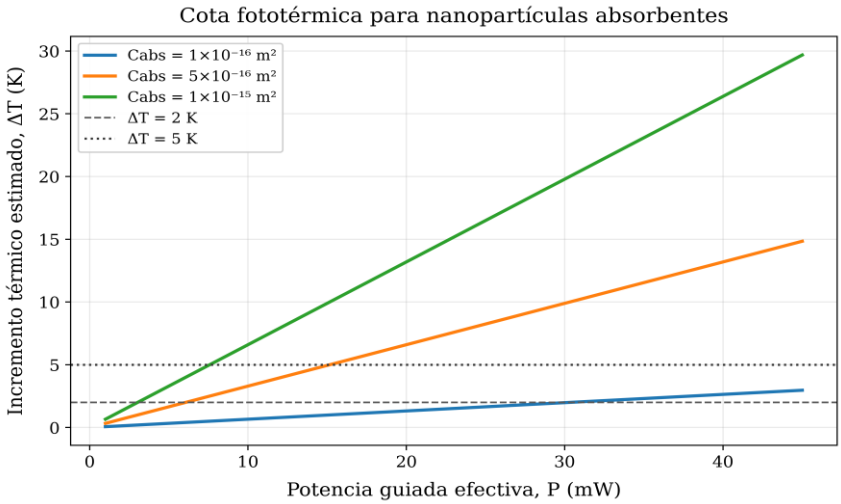


Figura 10. Cota del incremento térmico estimado para distintos valores de sección de absorción. La gráfica muestra que el diseño óptico debe equilibrar confinamiento y riesgo de calentamiento local.

Desde el punto de vista biológico, la utilidad principal de la plataforma es separar la función de actuación óptica de la función de lectura fluorescente. La fibra *taper* serviría para acercar y posicionar el marcador, mientras la microscopía de fluorescencia confirmaría su localización e interacción con la membrana. Esta combinación abre la posibilidad de estudiar regiones específicas de la célula con menor perturbación mecánica que la introducida por micropipetas o puntas de contacto.

No obstante, la implementación real debe acompañarse de controles estrictos. Es indispensable evaluar viabilidad celular, fotoblanqueo, agregación de nanopartículas, intensidad de emisión, estabilidad química del conjugado AuNP–rodamina y distancia fibra–célula. Asimismo, se recomienda validar primero la captura y el transporte de partículas fluorescentes libres, después sobre superficies inertes y sólo en una fase posterior sobre células AGS. De esta manera, el modelo numérico puede convertirse en un protocolo experimental sólido y reproducible.

CONCLUSIONES

El análisis desarrollado muestra que una fibra óptica *taper* puede ser una alternativa viable para posicionar de manera localizada marcadores fluorescentes en estudios celulares. Al reducirse progresivamente el diámetro de la fibra, una mayor parte del campo óptico se extiende hacia el medio externo en forma de campo evanescente. Esto genera una zona de interacción muy cercana a la superficie de la guía, con dimensiones submicrométricas, que puede aprovecharse para atraer, capturar y desplazar nanopartículas funcionalizadas sin necesidad de contacto mecánico directo.

Las ecuaciones empleadas se revisaron y se presentaron en una notación matemática más clara y completa, procurando que cada expresión estuviera respaldada por literatura especializada en óptica de guías, pinzas ópticas, dinámica browniana y fenómenos fototérmicos. Asimismo, las figuras adicionales se integraron como representaciones complementarias del mismo fenómeno físico: el

confinamiento del campo evanescente alrededor de la fibra y su rápida disminución al alejarse de la superficie.

Las simulaciones de alta resolución permiten observar que la eficiencia de captura depende de manera importante de la distancia inicial entre la nanopartícula y la fibra *taper*. En particular, la energía de atrapamiento debe ser suficiente para superar las fluctuaciones térmicas asociadas a la escala $k_B T$. Sin embargo, también se observa que el calentamiento de las nanopartículas de oro podría convertirse en una limitación relevante si no se controla adecuadamente la potencia óptica. Por esta razón, el diseño experimental debe considerar de forma conjunta la geometría del *taper*, la potencia empleada, la longitud de onda, el tamaño del marcador y el tiempo de exposición.

Como siguiente paso, se recomienda fabricar y caracterizar experimentalmente la fibra *taper*, medir la potencia óptica realmente acoplada y realizar primero pruebas con partículas fluorescentes libres. Una vez validado el comportamiento básico de captura y transporte, el sistema podría evaluarse en células AGS, incorporando controles de viabilidad y fototoxicidad. De esta manera, la plataforma propuesta podría avanzar hacia una herramienta óptica no invasiva para estudiar, en tiempo real, interacciones localizadas entre células y nanomateriales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Watanabe, D. Yamamoto y M. Sadgrove, “Position-controlled trapping of nanoparticles and quantum dots on a fiber taper”, *Physical Review A*, Vol. 108, 043512, 2023. DOI: 10.1103/PhysRevA.108.043512.

[2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm y S. Chu, “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, *Optics Letters*, Vol. 11, No. 5, 1986, pp. 288–290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.

[3] A. Ashkin, J. M. Dziedzic y T. Yamane, “Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams”, *Nature*, Vol. 330, 1987, pp. 769–771. DOI: 10.1038/330769a0.

[4] K. C. Neuman y S. M. Block, “Optical trapping”, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 9, 2004, pp. 2787–2809. DOI: 10.1063/1.1785844.

[5] H. Xin y B. Li, “Fiber-based optical trapping and manipulation”, *Frontiers of Optoelectronics*, Vol. 12, 2019, pp. 97–110. DOI: 10.1007/s12200-017-0755-z.

[6] X. Zhao, N. Zhao, Y. Shi, H. Xin y B. Li, “Optical Fiber Tweezers: A Versatile Tool for Optical Trapping and Manipulation”, *Micromachines*, Vol. 11, No. 2, 2020, 114. DOI: 10.3390/mi11020114.

[7] M. C. Frawley, I. Gusachenko, V. G. Truong, M. Sergides y S. Nic Chormaic, “Selective particle trapping and optical binding in the evanescent field of an optical nanofiber”, *Optics Express*, Vol. 22, No. 13, 2014, pp. 16322–16334. DOI: 10.1364/OE.22.016322.

[8] M. Daly, M. Sergides y S. Nic Chormaic, “Optical trapping and manipulation of micrometer and submicrometer particles”, *Laser & Photonics Reviews*, Vol. 9, No. 3, 2015, pp. 309–329. DOI: 10.1002/lpor.201500006.

[9] A. W. Snyder y J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*. Springer, 1983. DOI: 10.1007/978-1-4613-2813-1.

[10] K. Okamoto, *Fundamentals of Optical Waveguides*, 2nd ed. Academic Press/Elsevier, 2006.

[11] C. F. Bohren y D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley, 1983; edición electrónica Wiley, DOI: 10.1002/9783527618156.

[12] G. Baffou y R. Quidant, “Thermo-plasmonics: using metallic nanostructures as nano-sources of heat”, *Laser & Photonics Reviews*, Vol. 7, No. 2, 2013, pp. 171–187. DOI: 10.1002/lpor.201200003.

[13] I. Fratoddi et al., “Gold nanoparticles functionalized by rhodamine B isothiocyanate: A new tool to control plasmonic effects”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 513, 2018, pp. 10–19. DOI: 10.1016/j.jcis.2017.11.010.

[14] G. Li et al., “Detection and imaging of Hg(II) in vivo using glutathione-functionalized gold nanoparticles”, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 13, 2022, pp. 549–559. DOI: 10.3762/bjnano.13.46.
[15] P. B. Johnson y R. W. Christy, “Optical Constants of the Noble Metals”, *Physical Review B*, Vol. 6, No. 12, 1972, pp. 4370–4379. DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.
[16] C. W. Gardiner, *Handbook of Stochastic Methods*, 2nd ed. Springer, 1990.
[17] D. L. Ermak y J. A. McCammon, “Brownian dynamics with hydrodynamic interactions”, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 69, No. 4, 1978, pp. 1352–1360. DOI: 10.1063/1.436761.
[18] S. C. Barranco et al., “Establishment and characterization of an in vitro model system for human adenocarcinoma of the stomach”, *Cancer Research*, Vol. 43, 1983, pp. 1703–1709.
[19] ATCC, “AGS (CRL-1739) human gastric adenocarcinoma cell line product information”, American Type Culture Collection.

EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA SERS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA DE CONSUMO HUMANO

Luz María Martínez Calihua, Roberto Ysacc Sato Berrú, María Esther Mata Zamora, América Rosalba Vázquez Olmos y Elsi Violeta Mejia Uriarte

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
luzmtzcal@gmail.com

RESUMEN

En la NOM-127-SSA1-2021, el agua para uso y consumo humano se define como aquella que no causa efectos nocivos a la salud y que no presenta contaminantes en concentraciones superiores a los límites permisibles. Sin embargo, debido al crecimiento acelerado de la población y al desarrollo industrial, los procesos de potabilización se han vuelto cada vez más complejos. Aunque diversos contaminantes se encuentran regulados, su detección requiere técnicas analíticas específicas, métodos especializados, personal capacitado y recursos económicos considerables, mientras que muchos otros no están contemplados en la norma debido a las bajas concentraciones en las que se presentan. La espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS) es una técnica analítica basada en la dispersión inelástica de la luz, cuya intensidad se incrementa debido a las oscilaciones colectivas de los electrones en metales, conocidas como resonancia de plasmones superficiales. Este fenómeno amplifica el campo electromagnético local y, en consecuencia, la señal Raman[1]. En este trabajo se sintetizaron nanopartículas de plata (AgNP´s) *in situ* en diversas muestras de agua para consumo humano mediante la reducción de nitrato de plata, recurriendo a las moléculas presentes en la propia muestra con capacidad reductora. Se realizaron diferentes ensayos en los que la concentración final de $AgNO_3$ se mantuvo en el intervalo de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} M, en función de la cantidad de especies reductoras presentes. Posteriormente, las muestras se expusieron a luz blanca, con un tiempo promedio de foto reducción de 15 a 20 minutos. La formación de AgNPs se comprobó mediante espectroscopia UV-Vis, identificando la banda característica de resonancia de plasmones superficiales en el intervalo de 400–420 nm. Finalmente, se empleó espectroscopía Raman-SERS para obtener información estructural de los compuestos orgánicos presentes en las muestras de agua. Los resultados demuestran que la síntesis *in situ* de AgNP´s por foto reducción constituye una estrategia viable para la generación de sustratos SERS directamente en muestras de agua, permitiendo la detección y caracterización estructural de contaminantes orgánicos a bajas concentraciones. En este trabajo se evaluó la técnica SERS con dos analitos de interés: Ibuprofeno y Acetaminofén, analgésicos de amplio consumo a nivel mundial que se han identificado en diversas fuentes de agua para consumo humano. Mediante esta técnica se detectó su información estructural de ambos compuestos a concentraciones inferiores a $5x10^{-8}$ gramos.

INTRODUCCIÓN

El agua destinada para el uso y consumo humano debe de cumplir con diversas especificaciones que garanticen su calidad e inocuidad. En México, la NOM-127-SSA1-2021 regula características químicas, microbiológicas, físicas y radiactivas, esta norma es de observancia obligatoria y define al agua de consumo humano como toda aquella que no causa efectos nocivos a la salud y que no presenta propiedades objetables o contaminantes en concentraciones fuera de los límites permisibles y que no proviene de aguas residuales tratadas. Sin embargo, la regulación normativa actual de los denominados contaminantes emergentes continúa siendo limitada, debido principalmente a que estos compuestos suelen encontrarse en concentraciones trazas en el medio ambiente[2], usualmente van desde nanogramos por litro hasta los microgramos por litro[3].

Dentro de estos contaminantes emergentes se encuentran diversos compuestos químicos, productos farmacéuticos, pesticidas, aditivos industriales y alimentarios, micro plásticos, nano plásticos, detergentes, combustibles, aditivos, plastificantes, tensoactivos, colorantes, tintes textiles,

nutracéuticos y otros materiales[4], estos ingresan a cuerpos de agua por diferentes vías, en el caso de fármacos como el ibuprofeno y acetaminofén llegan a través de la excreción humana[2], residuos de su síntesis, aguas residuales no tratadas, su presencia aún en niveles de traza puede representar un riesgo potencial para la salud humana. Algunos estudios han determinado que estos fármacos son conocidos por inducir toxicidad en los organismos acuáticos[5] la importancia de estos fármacos y otros fármacos antiinflamatorios no esteroideos en el ambiente radica en sus propiedades de naturaleza bioacumulativa, baja absorción por la materia orgánica, lo que le permite permanecer en el ambiente acuático durante periodos prolongados. Debido a ello, incluso en concentraciones trazas, estos compuestos pueden representar un riesgo potencial para los ecosistemas y la salud humana. Sin embargo, muchos de los métodos convencionales para la identificación, cuantificación y remoción de este tipo de contaminantes emergentes requieren procedimientos complejos, tiempo de análisis prolongados, infraestructura especializada y altos costos operativos. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar metodologías analíticas más sensibles, rápidas y accesibles para la detección de compuestos presentes a bajas concentraciones.

Una de las técnicas con mayor potencial para este propósito es la espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS, por sus siglas en ingles), una técnica analítica basada en la amplificación de la señal Raman mediante el uso de nanomateriales metálicos, permitiendo la detección y caracterización estructural de analitos en niveles traza[1].

En este trabajo se evaluó la técnica de espectroscopia Raman mejorada por superficie (SERS) para la detección de ibuprofeno y acetaminofén en muestras de agua para consumo humano. Para ello, se sintetizaron nanopartículas de plata *in situ* mediante foto reducción de nitrato de plata y posteriormente se caracterizaron por espectroscopía UV-Vis y Raman SERS.

TEORÍA

La espectroscopía Raman es una técnica analítica basada en la dispersión inelástica de la luz. Durante este proceso, el campo eléctrico de la radiación incidente induce una polarización momentánea en la nube electrónica de la molécula, generando un estado virtual en lugar de una transición electrónica real. Como consecuencia, una pequeña fracción de la luz dispersada experimenta un cambio en su frecuencia debido a las variaciones en la polarizabilidad molecular asociadas a los modos vibracionales. Este fenómeno origina el efecto Raman, produciendo un espectro característico que proporciona información estructural y química de la muestra.

A pesar de sus ventajas, la espectroscopía Raman presenta diversas limitaciones, principalmente la baja intensidad de la señal generada, ya que aproximadamente solo 1 de cada 10^6 fotones dispersados contribuye al efecto Raman. Además, en muchas muestras las señales Raman pueden verse enmascaradas por fenómenos de fluorescencia, dificultando su detección[6], para superar estas limitaciones se emplea la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS, por sus siglas en inglés), técnica basada en la amplificación de la señal Raman mediante la adsorción de moléculas sobre superficies metálicas nanoestructuradas, generalmente nanopartículas de plata, oro o cobre. Estas nanoestructuras, con tamaños comprendidos entre 1 y 100 nm, poseen propiedades ópticas capaces de soportar resonancias plasmónicas superficiales.

La interacción entre la nube electrónica de las nanopartículas metálicas y el campo electromagnético de la luz incidente genera un incremento significativo del campo eléctrico local. Este fenómeno se atribuye principalmente a la resonancia de plasmones superficiales localizados (LSPR), responsable de la formación de regiones de alta intensidad electromagnética conocidas como “hot spots”.

Debido a este efecto, la técnica SERS puede alcanzar factores de amplificación del orden de 10^6 hasta 10^{14}, dependiendo de la geometría, composición y distribución de las nanopartículas[7]. Experimentalmente, estas propiedades ópticas suelen caracterizarse mediante espectroscopía UV-Vis, donde las nanopartículas metálicas presentan bandas de resonancia plasmónica en la región visible e infrarroja cercana, aproximadamente entre 400 y 1000 nm [8]

Gracias a esta amplificación, SERS permite detectar compuestos presentes en concentraciones muy bajas, convirtiéndose en una herramienta de gran interés para aplicaciones ambientales, farmacéuticas y biológicas.

En el ámbito ambiental, los contaminantes emergentes corresponden a sustancias que no son monitoreadas ni reguladas de manera rutinaria, aunque pueden representar riesgos para la salud y el medio ambiente[9]. Entre ellos se incluyen fármacos, pesticidas, productos de cuidado personal, disruptores endocrinos, micro plásticos y diversos compuestos químicos industriales.

Los productos farmacéuticos pertenecen al grupo de los productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs), subclase de los contaminantes orgánicos emergentes (COEs). Muchos de estos compuestos presentan alta estabilidad química, baja biodegradabilidad y capacidad de persistencia en medios acuáticos, lo que favorece su acumulación en cuerpos de agua. Su ingreso al agua potable ocurre principalmente a través de descargas domésticas, hospitalarias e industriales, además de sistemas convencionales de tratamiento que no logran eliminarlos completamente.

Entre los fármacos de mayor consumo y automedicación a nivel mundial se encuentran el Ibuprofeno y el Acetaminofén[10]. Actualmente, la detección de contaminantes emergentes se realiza principalmente mediante técnicas cromatográficas acopladas a espectrometría de masas y métodos de preconcentración de muestra, como extracción en fase sólida o extracción líquido-líquido[11]. Sin embargo, estas metodologías requieren infraestructura especializada, preparación extensa de muestra y altos costos operativos.

En comparación, la técnica SERS ofrece ventajas importantes en términos de sensibilidad, rapidez analítica y menor requerimiento de instrumentación compleja, además de la posibilidad de desarrollar sensores portátiles para monitoreo ambiental *in situ*. Por lo anterior, en este trabajo se propone el desarrollo de una metodología basada en espectroscopía Raman mejorada por superficie para la detección de Ibuprofeno y Acetaminofén, así como de sus mezclas, utilizando nanopartículas de plata sintetizadas *in situ* como sustratos plasmónicos para el incremento de la señal Raman.

METODOLOGÍA

Preparación de Nanopartículas de plata:

Se preparó una disolución de nitrato de plata a una concentración de 0.019 M; para ello, se disolvió la cantidad correspondientede en 25 mL de agua molecular (Sigma Aldrich) . La reacción de síntesis se llevó a cabo mezclando 5 mL de la disolución de muestra (ibuprofeno, acetaminofén o la mezcla de ambos) a diferentes concentraciones, con 0.5 mL de disolución de $AgNO_3$ 0.019 M, obteniendo una concentración final de 1×10^{-3} M. Para favorecer la reducción del ion Ag^+ y la formación de nanopartículas de plata, las muestras se mantuvieron bajo exposición a luz blanca. El tiempo de fotoreducción varió dependiendo de la concentración de la muestra y de la concentración de $AgNO_3$ empleada. Posteriormente, la metodología fue aplicada a diferentes muestras de agua potable embotellada con la finalidad de evaluar el potencial de la técnica SERS en matrices reales de agua para consumo humano.

Obtención de espectros.

Para la visualización de plasmón característico de AgNPs (420 nm) se utilizó un espectrómetro Cary 5000 UV-visible-NIR de la marca Agilent Technologies® de doble haz y el software Cary WinUV así como también el equipo UV-Vis Ocean Optics HR4000.

Los espectros Raman se obtuvieron depositando 0.4 microlitros de muestra en una superficie metálica de aluminio, se dejó evaporar y posteriormente se utilizó un microscopio confocal Raman de la marca Oxford Instruments-WITec®, laser de 532 nm se realizaron barridos sobre la superficie de la muestra en un área de 20 x 20 µm para generar el mapa espectral, utilizando una potencia de por un tiempo aproximado de cinco minutos de exposición.

.

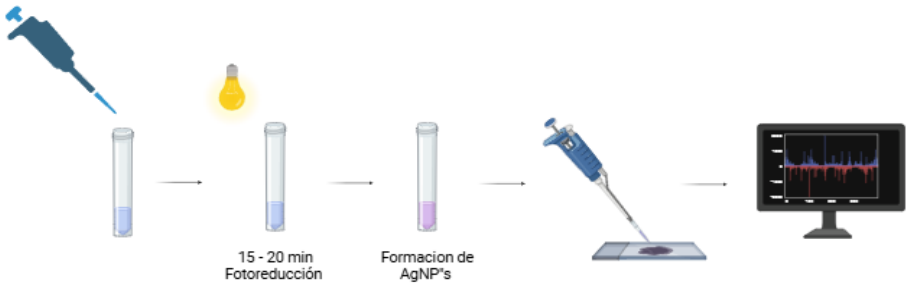


Figura 1 Metodología de síntesis de AgNPs

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espectros de UV-Vis de disoluciones de Ibuprofeno

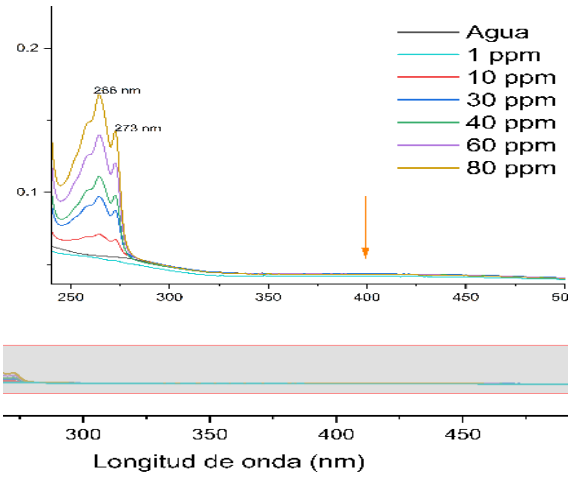


Figura 2 Espectro UV-Vis de disoluciones de ibuprofeno

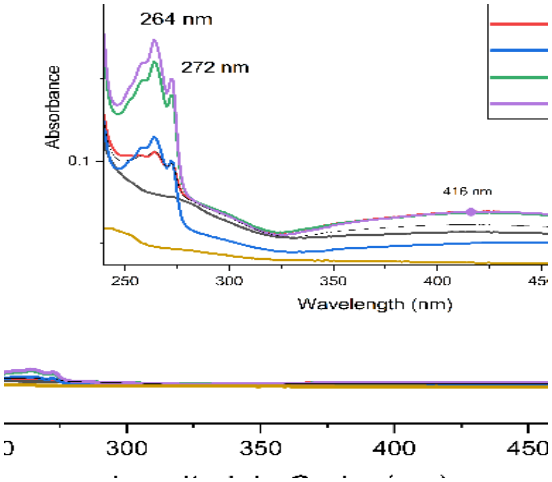


Figura 3 Espectro UV-vis de disoluciones de ibuprofeno con $AgNO_3$ después de exponerlo a luz blanca.

En las Figuras 2 y 3 se muestran los espectros UV-Vis de las disoluciones de ibuprofeno, en la figura 1 se observa un máximo de absorbancia alrededor de 224 nm, asociado a transiciones electrónicas $\pi \rightarrow \pi *$ del anillo aromático, asimismo, las señales observadas en 264 nm y un hombro en 273 nm se atribuyen a transiciones electrónicas del sistema conjugado del anillo aromático y al grupo carboxilo presentes en la molécula de ibuprofeno.

Por otra parte, en la Figura 3 se observa una señal alrededor de los 416 nm después de la adición de $AgNO_3$ y la exposición a luz blanca, atribuida a la resonancia de plasmones superficiales localizados de las nanopartículas de platas formadas *in situ*. Adicionalmente, algunas señales correspondientes a diferentes concentraciones presentan comportamientos similares o parcialmente traslapados, lo que podría estar relacionado con interacciones entre el $AgNO_3$ y la disolución de ibuprofeno, afectando la respuesta espectral.

Espectro Raman

El espectro Raman del ibuprofeno correspondiente a la microgota desecada sin nanopartículas (Figura 4 a) no presenta bandas claramente definidas debido a la baja concentración del analito (~40 ng) y a la débil intensidad inherente del efecto Raman. En contraste, el espectro Raman-SERS (Figura 4 b) muestra una amplificación significativa de la señal, permitiendo observar bandas vibracionales asociadas a grupos funcionales característicos del ibuprofeno incluso a bajas cantidades de muestra.

En la Figura 4 b se observan bandas alrededor de 114 y 265 cm^{-1}, asociadas a interacciones entre el analito y la superficie metálica de las nanopartículas de plata. La señal en 630 cm^{-1} puede atribuirse a deformaciones del anillo aromático, mostrando correspondencia con la banda observada en 638 cm^{-1} en el espectro de referencia del ibuprofeno cristalino (Figura 4 c)

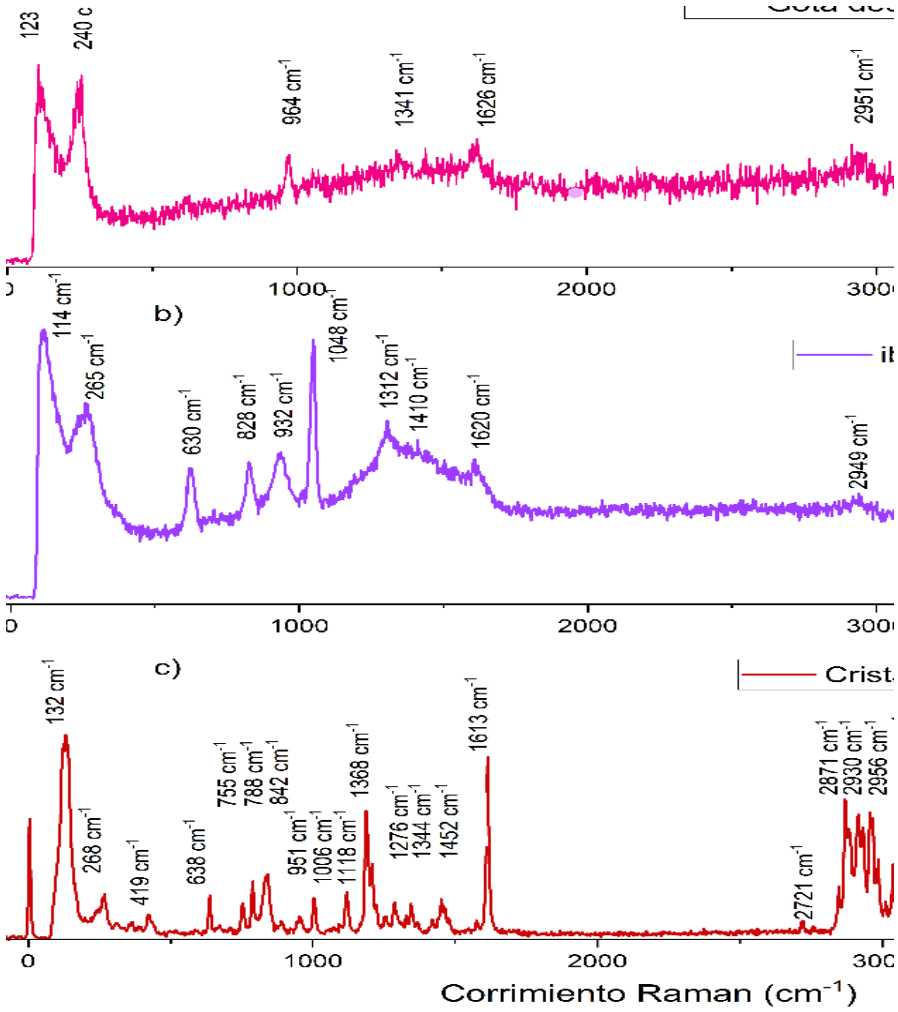


Figura 4: Espectros Raman de a) microgota evaporada de disolución de ibuprofeno a una concentración de 10 ppm sin nanopartículas de plata; b) microgota evaporada de disolución de ibuprofeno a una concentración de 10 ppm con nanopartículas de plata y c) Cristales de ibuprofeno (Sigma-Aldrich)

Asimismo, las bandas observadas en 828 y 1048 cm^{-1} se relacionan con vibraciones del anillo aromático. La señal alrededor de 932 cm^{-1} podría asociarse a vibraciones del grupo carboxilo o a modos vibracionales del anillo aromático. Por otra parte, la banda observada en 1620 cm^{-1} presenta similitud con la señal de 1613 cm^{-1} del espectro de referencia y puede corresponder al estiramiento

C=C del sistema aromático, dentro del intervalo reportado en la literatura[11]. Finalmente, las bandas observadas entre 1410 y 1452 cm^{-1} pueden relacionarse con deformaciones C–H de grupos metilo presentes en la estructura del ibuprofeno.

Espectro UV-Vis de disolución de Acetaminofén

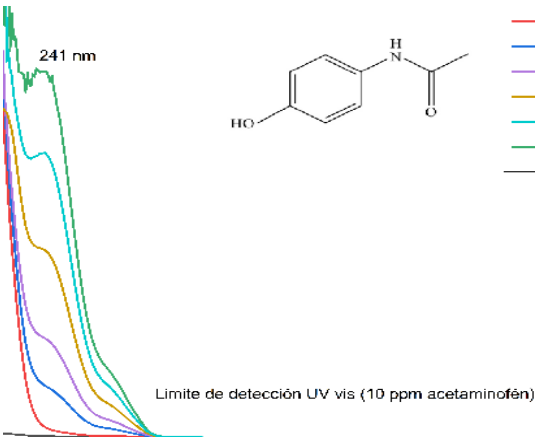


Figura 5. Espectro UV-Vis de disoluciones de acetaminofén

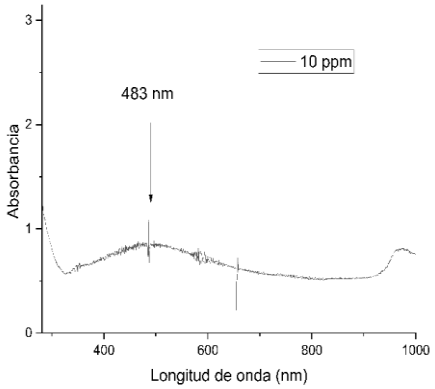


Figura 6. Espectro UV-Vis de acetaminofén + $AgNO_3$, después de exponerlo a luz blanco.

Las Figuras 5 y 6, corresponden a los espectros UV-Vis de las disoluciones de acetaminofén. En la Figura 5 se muestran los espectros obtenidos a diferentes concentraciones del analito, observándose una banda de absorción alrededor de 241 nm asociada a transiciones electrónicas del anillo aromático presente en la molécula de acetaminofén. Por otra parte, en la figura 6 muestra el espectro UV-Vis de la disolución de acetaminofén (10 ppm) después de la adición de $AgNO_3$ y su exposición a luz blanca durante aproximadamente 25 minutos. En este espectro se observa una banda alrededor de 483 nm, atribuida a la resonancia de AgNPs, el cual se encuentra desplazado respecto al plasmón típico de AgNPs esféricas (400-420 nm), esto podría ser debido al tamaño de las partículas.

Espectro Raman

Nuevamente como en el caso de ibuprofeno en la Figura 7 a se observa que la espectroscopía Raman convencional no fue suficiente para detectar claramente las señales correspondientes al acetaminofén debido a la cantidad de muestra analizada 40 ng. En contraste el espectro obtenido por SERS mostrado en la Figura 7 B, presenta una mejora en intensidad y definición de las señales respecto al Raman convencional aún bajo las mismas condiciones experimentales y concentración de analito. La banda observada alrededor de 265 cm^{-1} pueden relacionarse con la interacción entre la muestra y la superficie metálica de las nanopartículas de plata. La señal en 375 cm-1 puede corresponder a la deformación del anillo aromático, aunque presenta un ligero desplazamiento a los valores reportados en la literatura (390–400 cm^{-1}), esto puede atribuirse al efecto SERS y la interacción molécula metal. Las señales de 959 cm^{-1}, 965 cm^{-1} y en 1618 cm^{-1} también corresponden al estiramiento del anillo aromático C-C, en 1556 cm^{-1}se encuentra otra señal que se atribuye a un grupo amida secundaria[12]. Si bien las señales se encuentran a muy baja intensidad estas son más definidas comparadas con el espectro Raman Convencional.

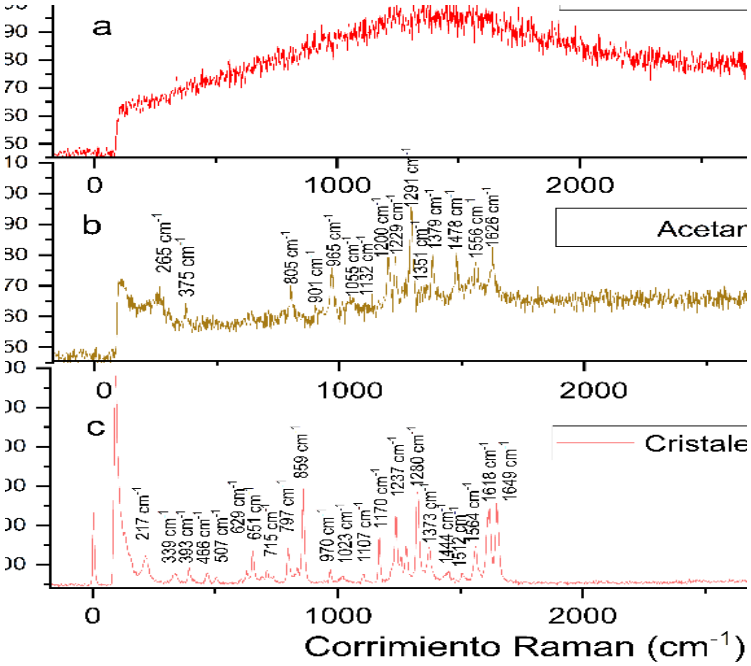


Figura 7: Espectros Raman de a) microgota evaporada de disolución de Acetaminofén a una concentración de 10 ppm sin nanopartículas de plata; b) microgota evaporada de disolución de acetaminofén a una concentración de 10 ppm con nanopartículas de plata y C) Cristales de acetaminofén (Sigma-Aldrich)

Espectro UV-Vis de Mix de analitos (Ibuprofeno y acetaminofén)

En la Figura 8 se muestra el espectro UV-Vis de una mezcla de ambas moléculas, ambos a una concentración de 10 ppm y en volúmenes iguales. La disolución se expuso a luz blanca durante 30 minutos, sin embargo, la señal plasmónica característica se observó después de 6 h de exposición continua. Este comportamiento puede deberse a diversos factores. En primer lugar, ambos analitos son reductores débiles por lo que la formación inicial de núcleos de plata metálica ocurre de forma muy lenta. Además, al coexistir en la misma disolución, ibuprofeno y acetaminofén pueden competir entre sí por interactuar con los iones plata, ya sea por complejación o adsorción, lo cual reduce aún más la disponibilidad de Ag^+ para reducirse. Por otro lado, la foto reducción inducida por luz blanca depende de la intensidad y del espectro emitido; si la fuente no proporciona suficiente energía, el proceso se vuelve poco eficiente y retrasa el crecimiento de las nanopartículas hasta un tamaño que genere una banda plasmónica visible.

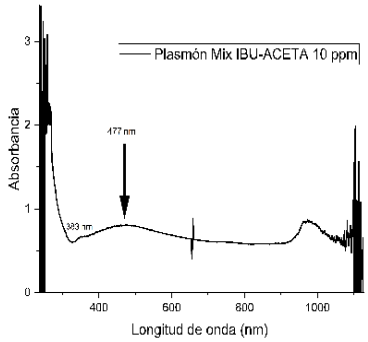


Figura 8 Plasmón de mix de acetaminofén e ibuprofeno a una concentración de 10 ppm

Espectro Raman de Mix de fármacos

El espectro SERS de la mezcla (Figura 9) muestra bandas atribuibles tanto a ibuprofeno como a acetaminofén. Las señales en 1320 cm^{-1} y 1426 cm^{-1} se asignan preferentemente a vibraciones aromáticas y al grupo carboxilo del ibuprofeno, respectivamente. Las bandas en el rango de1125–1248 cm^{-1} y 1628 cm^{-1} son características de los grupos fenol y amida y del estiramiento C=O de acetaminofén. Las intensidades relativas están afectadas por efectos SERS y solapamientos, por lo que las asignaciones se confirmaron mediante comparación con los espectros de referencia de los cristales puros.

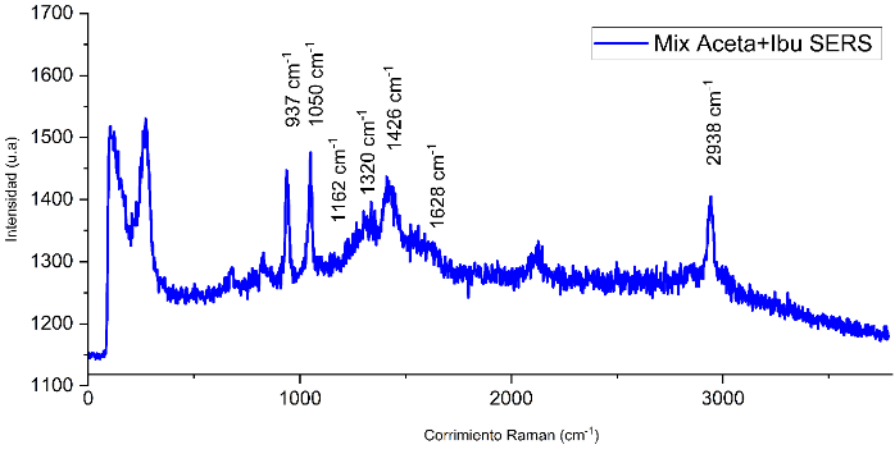
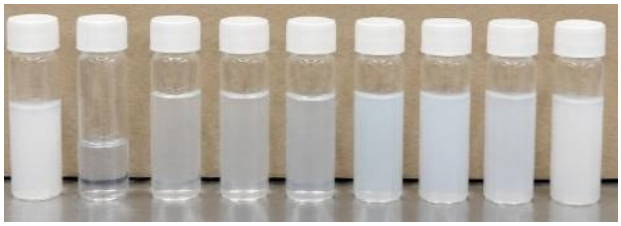


Figura 9: Espectro SERS de Mix de Ibuprofeno y Acetaminofén a una concentración de 10 ppm.

Muestras de diferentes aguas embotelladas

De manera preliminar, la metodología se aplicó a muestras reales de diferentes aguas embotelladas Figura 10 con la finalidad de evaluar el comportamiento del sistema SERS en matrices más complejas.



Al emplear concentraciones de 1×10^{-3} M $AgNO_3$ se observó la formación de un precipitado blanco, posiblemente asociado a la formación de AgCl debido a la presencia de cloruros y otras sales disueltas en el agua.

$$Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl\,(s)$$

Bajo estas condiciones no se observó una banda plasmónica definida en los espectros UV-Vis, lo que sugiere que la formación de nanopartículas de plata fue limitada o bien que predominó la precipitación de AgCl. Sin embargo, en algunos espectros Raman-SERS se lograron observar diversas señales, lo que podría indicar la presencia parcial de sitios activos capaces de producir cierta amplificación Raman (Figura 11), las bandas observadas en el espectro pueden asociarse a diferentes vibraciones moleculares. La señal en 917 cm^{-1} se atribuye a la respiración del anillo aromático, la señal en 1173 cm^{-1} corresponde al estiramiento simétrico de SO_2, la banda en 1393 cm^{-}

[1] se relaciona con el estiramiento de anillo aromático, en 1626 cm^{-1} se asocia al estiramiento $C = C$ de anillos aromaticos, estas bandas sugieren la presencia de una molécula con estructura aromatica y grupos funcionales tipo sulfona $(R - SO_2 - R_2)$ o sulfonamida $(R - SO_2 - NH_2)$, los cuales en este contexto pueden ser fundamentales en la sintesis de algunos farmacos sulfa[14] .

Posteriormente, al disminuir la concentración de 1×10^{-3} M $AgNO_3$ a 5×10^{-5} M $AgNO_3$, las muestras desarrollaron una coloración rosada-grisácea y presentaron una banda plasmónica en UV-Vis, indicando la formación de nanopartículas de plata. Sin embargo, las señales Raman-SERS obtenidas mostraron baja intensidad y poca definición, lo que sugiere posibles interferencias de matriz que afectan tanto la formación de nanoestructuras plasmónicas como la adsorción de los analitos sobre la superficie metálica.

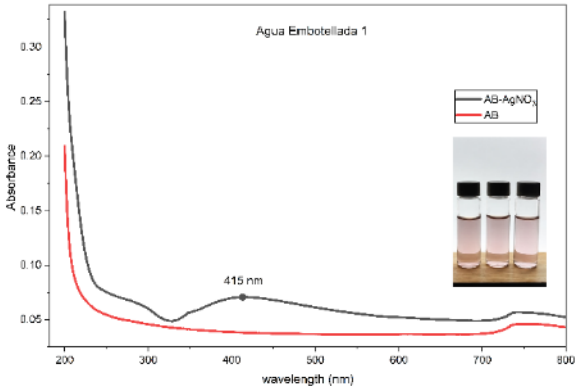


Figura 11 Espectro UV-Vis Agua embotellada

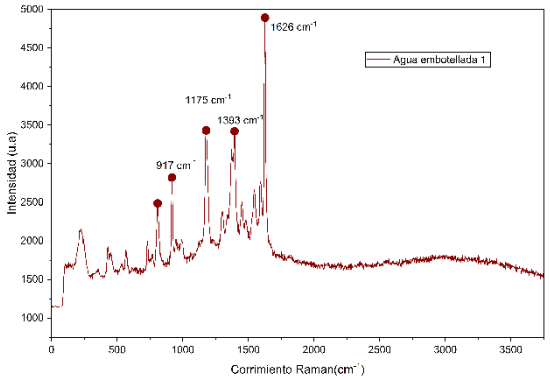


Figura 12 Espectro Raman SERS de muestra de agua embotellada 1 obtenida con una concentración alta de $AgNO_3$ (10^{-3}M) sin visualización de plasmón

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica, LUCE_ICAT_UNAM por la caracterización de las muestras mediante las Técnicas, Raman SERS y UV-Vis

CONCLUSIONES

La técnica SERS permitió amplificar señales Raman de Ibuprofeno y Acetaminofén mediante nanopartículas de plata sintetizadas *in situ* por foto reducción. La presencia de la señal plasmónica confirmo la generación de nanopartículas y los espectros Raman-SERS mostraron señales más definidas en comparación con la espectroscopia Raman convencional, permitiendo la visualización de las señales correspondientes a los grupos funcionales característicos de los analitos estudiados a bajas concentraciones.

En cuanto a las pruebas preliminares realizadas en muestras reales de agua embotellada al ser una matriz real, su composición puede afectar la formación de nanopartículas de plata y por ende la respuesta SERS, sin embargo, a pesar de estas limitantes, los resultados obtenidos demuestran que la técnica es funcional como herramienta para la detección de contaminantes emergentes en agua de consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

1. Atenco Paredes, Aleida Amairani, sustentante (2024) Estudio preliminar de la espectroscopía Raman intensificada por superficie (SERS), aplicadas en la detección del glifosato en un herbicida comercial.

2. Martins, N. C., Fateixa, S., Nogueira, H. I., & Trindade, T. (2024). Surface-enhanced Raman scattering detection of thiram and ciprofloxacin using chitosan–silver coated paper substrates. *Analyst*, *149*(1), 244-253.
3. Pérez, S., Barceló, D., 2007. Application of advanced MS techniques to analysis and identification of human and microbial metabolites of pharmaceuticals in the aquatic environment. TrAC. Trends. Anal. Chem. 26(6): 494–514.
4. Torres, A., Rodríguez, H. A., & Ayala, M. (2023). Contaminantes emergentes en México: panorama actual, retos y una posible solución biotecnológica. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, *26*. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.590
5. Hardman, J.G., Limbird, L.E., Goodman, A., 2003. Las Bases Farmacológicas De La Terapéutica. 10th ed. México DF: McGraw-Hill Interamericana
6. Orozco, B. S. (2018). Fundamentos de la Espectroscopía Raman Heterodina. *Centro de Investigaciones en óptica, AC*.
7. Jiménez Cisneros, J. (2021, December 18). Noble Metal Nanoparticles in SERS. In *Encyclopedia*. https://encyclopedia.pub/entry/17287
8. Caparroso, G. E. Simulación del campo electromagnético en sustratos SERS de nanofibras ordenadas recubiertas con metales Simulation of electromagnetic field in SERS substrates consisting of ordered nanofibers coated.
9. Álvarez Calvopiña, M. D., Molina Maya, M. J., & Recalde Parra, G. A. (2021). Contaminantes emergentes en aguas y remediación de suelos con nanopartículas.
10. Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, *7*(2), 52-73.
11. Hernández-Quiroz, M., Ruiz-Meza, D., Rojo-Callejas, F., & Ponce de León-Hill, C. (2019). Determinación de la distribución de contaminantes emergentes en agua intersticial en sedimentos de humedal mediante la optimización y validación de un método analítico. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *35*(2), 407-419.
12. Sócrates, G. (2001) *Infrared and Raman characteristic group frequencies: Tables and Charts* (3rd ed.) Baffins Lane: John Wiley &Sons.
13. Shende, C., Smith, W., Brouillette, C., & Farquharson, S. (2014). Drug stability analysis by Raman spectroscopy. *Pharmaceutics*, *6*(4), 651-662.
14. Mondal, S., & Malakar, S. (2020). Synthesis of sulfonamide and their synthetic and therapeutic applications: Recent advances. *Tetrahedron*, *76*(48), 131662.

PRODUCCIÓN DEL QUARK TOP PESADO T MEDIANTE EL PROCESO $\mu^+\mu^- \to V \to \bar{T}T$ EN EL MARCO DEL MODELO BESTEST LITTLE HIGGS

David Espinosa Gómez[1], Eligio Cruz Albaro[2], Alejandro B. Gutiérrez Rodríguez[2], Fernando Iguazú Ramírez Zavaleta[1], Eduardo Salvador Tututi Hernández[1], Alan Moisés Fernández Figueroa[1]

[1]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [2]Universidad Autónoma de Zacatecas
david.espinosa@umich.mx

RESUMEN

El desarrollo de nuevos colisionadores de partículas cada vez más energéticos y limpios como el colisionador de muones, abre nuevas oportunidades para la búsqueda de procesos raros que involucran la producción de partículas exóticas predichas por extensiones del Modelo Estándar. En este trabajo, analizamos la producción del quark top pesado, denotado como $\boldsymbol{T}$, que surge en el contexto del modelo Bestest Little Higgs (BLH). De esta manera, consideramos el canal $\boldsymbol{\mu^+\mu^- \to V \to \bar{T}T}$ como el canal de producción del quark $\boldsymbol{T}$, donde $\boldsymbol{V = \gamma, Z, Z'}$, siendo $\boldsymbol{\gamma}$ un fotón, $\boldsymbol{Z}$ un bosón de norma del ME y $\boldsymbol{Z'}$un bosón pesado del BLHM. Este último bosón de norma presenta propiedades muy interesantes ya que también constituye una vía para estudiar efectos de nueva física. En el BLH, la nueva física viene representado por las escalas de energía $\boldsymbol{f}$ y $\boldsymbol{F}$, donde hemos establecido un rango para la escala $\boldsymbol{f}$ de 1 a 2 teraelectronvoltios (TeV), mientras que la escala de energía $\boldsymbol{F}$, se le ha asignado ciertos valores fijos como $\boldsymbol{F = 7}$ TeV y $\boldsymbol{F = 8}$ TeV. En cuanto al canal de producción de interés para el quark $\boldsymbol{T}$, determinamos la contribución de los diferentes bosones de norma, y se encontró que la sección eficaz de producción dominante surge para el bosón $\boldsymbol{Z'}$ como partícula mediadora, generando $\boldsymbol{\sigma(\mu^+\mu^- \to Z' \to \bar{T}T) \sim 10^1}$fb en todo el rango de energías establecidas para nuestro estudio.

INTRODUCCIÓN

El modelo estándar (ME) es una teoría cuántica relativista construida a partir del grupo de norma $\boldsymbol{SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y}$. Este modelo es considerado una de las teorías más exitosas de la física de partículas elementales, sin embargo, presenta diversos problemas, tales como el problema de jerarquía de masas, la prueba de la existencia de la masa de los neutrinos [1,2], entre otros. De esta manera, los modelos extendidos surgen como posibles soluciones a algunos de los problemas antes mencionados; entre ellas se encuentra el modelo BLH. Este modelo se construye a partir de dos modelos sigma no lineales que son basados en las simetrías $\boldsymbol{SO(6)_A \times SO(6)_B}$ y $\boldsymbol{SU(2)_C \times SU_D}$, donde se emplea un rompimiento colectivo de las simetrías [3]. De esta manera, el primer grupo se rompe al subgrupo $\boldsymbol{SO(6)_V}$ a la escala de energía $\boldsymbol{f}$, mientras que el segundo grupo de simetría es roto al subgrupo $\boldsymbol{SU(2)}$ a la escala $\boldsymbol{F}$. Además, en esta teoría se predicen nuevos quarks y bosones de norma pesados; estas partículas nuevas surgen a la escala de TeV. Para el caso de estudio, las masas de estas partículas están dadas por las expresiones:

$$\boldsymbol{m_T = \sqrt{\left(y_1^2 + y_2^2\right)f^2 + \frac{9v_1^2y_1^2y_2^2y_3^2}{\left(y_1^2 + y_2^2\right)\left(y_2^2 - y_3^2\right)}}}, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{m_{Z'} = m_{W'} + \frac{g^2 s_W^2 v^4}{16\, c_W^2 (f^2 + F^2)}\left(s_g^2 - s_g^2\right)^2}, \qquad (2)$$

donde $\boldsymbol{y_1, y_2, y_3}$ son los acoplamientos de Yukawa y $\boldsymbol{m_{W'}}$ es la masa del bosón cargado $\boldsymbol{W'}$ [3,4,5,6]. Por otro lado, la importancia del estudio de los compañeros del quark top pesado o nuevos quarks pesados, está respaldada por las búsquedas experimentales actuales [7], tanto en CMS y como

ATLAS. Estas búsquedas de un compañero del quark top del ME se han llevado a cabo hasta ahora bajo la suposición de que se desintegra esencialmente en partículas ME [8]. Además, la colaboración CMS [9] presenta una búsqueda de pares de quarks-antiquarks de tipo vectorial a través de colisiones protón-protón con una energía en su centro de masa de 13 TeV. Ellos reportan el límite de exclusión de masas inferiores a 1.54 TeV con un 95% de nivel de confianza. Asu vez, la colaboración ATLAS [10], realiza una búsqueda de un quark $\boldsymbol{T}$ que se desintegra en un bosón de Higgs y un quark top en colisiones protón-protón a 13 TeV. Aquí, se establecen límites de exclusión para la masa del quark $\boldsymbol{T}$ menores de 1.7 TeV. Cabe señalar que los límites de exclusión establecidos por los colaboradores experimentales permiten un estudio de esta partícula con la extensión de los límites establecidos para búsquedas posteriores.

TEORÍA Y METODOLOGÍA

La forma de describir un proceso cuántico relativista, que en nuestro estudio es la colisión, es mediante diagramas de Feynman. La dinámica de un proceso de dispersión está contenida en la matriz $\boldsymbol{S}$, esta cantidad invariante de Lorentz se puede escribir como $\boldsymbol{S = 1 + iT}$ [11]. Esta matriz de dispersión es proporciona a la amplitud de colisión en el espacio de momentos:

$$_{in}\langle \boldsymbol{p_1 p_2}|\boldsymbol{iT}|\boldsymbol{k_1 k_2 \ldots}\rangle_{out} = (2\pi)^4 \delta^4\left(\boldsymbol{p_1 + p_2 - \sum_i k_i}\right) \times \mathcal{M}(\boldsymbol{p_1, p_2 \rightarrow \{k_i\}}). \quad (3)$$

La cantidad $\boldsymbol{M}$ permite calcular la sección eficaz mediante la siguiente fórmula

$$d\sigma = \frac{|\vec{\boldsymbol{p}}_3|}{\sqrt{\boldsymbol{m}}\sqrt{(\boldsymbol{p_1}.\boldsymbol{p_2})^2 - \boldsymbol{m_1^2 m_2^2}}} \frac{\boldsymbol{d\Omega_3}}{\boldsymbol{64\pi^2}}|M|^2 = \frac{|\vec{\boldsymbol{p}}_3|\boldsymbol{d\Omega_3}}{\boldsymbol{64\pi^2}|\vec{\boldsymbol{p}}_1|}|M|^2, \quad (4)$$

donde $\boldsymbol{d\Omega_3}$ es el diferencial de ángulo sólido, $\left|\vec{\boldsymbol{p}}_1\right| = \frac{1}{\boldsymbol{s_{12}}}\sqrt{\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{s_{12}^2, m_1^2, m_2^2})}$, $\left|\vec{\boldsymbol{p}}_3\right| = \frac{1}{\boldsymbol{2M}}\sqrt{\boldsymbol{\lambda}(\boldsymbol{M^2, s_{12}^2, m_3^2})}$ y $\boldsymbol{s_{12}} = (\boldsymbol{p_1} + \boldsymbol{p_2})^2$. Aquí, $\boldsymbol{\lambda}$ es la función de Källén. De acuerdo con la información anterior, el diagrama de Feynman que contribuye al proceso $\boldsymbol{\mu^+\mu^- \rightarrow V \rightarrow \bar{T}T}$ se muestra en la Figura 1. El par de muones del ME que actúan como partículas iniciales tienen cuadrimomentos $\boldsymbol{p_1}$ y $\boldsymbol{p_2}$, mientras que en los estados finales tienen momentos $\boldsymbol{k_1}$ y $\boldsymbol{k_2}$, que corresponden al par top-antitop pesado del BLHM. En cuanto, a los bosones de norma, tales como el fotón, bosón de norma neutro del ME y bosón de norma neutro del BLHM, tienen el papel de partículas mediadoras con momentos $\boldsymbol{q} = \boldsymbol{p_1} + \boldsymbol{p_2} = \boldsymbol{k_1} + \boldsymbol{k_2}$.

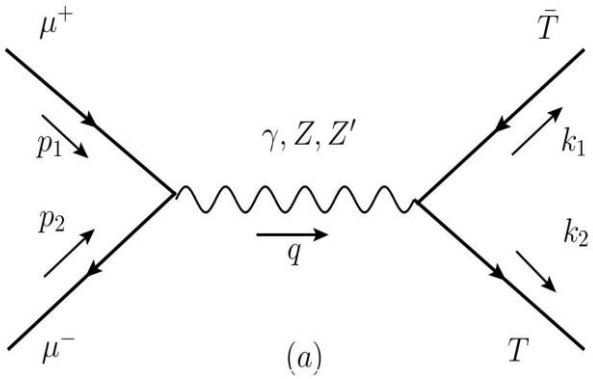


Figura 1. Diagramas de Feynman sobre el proceso $\boldsymbol{\mu^+\mu^- \rightarrow V \rightarrow \bar{T}T}$, con $\boldsymbol{V = \gamma, Z, Z'}$.

La amplitud encontrada para el proceso estudiado es dada por

$$\mathcal{M}_V(\mu^-\mu^+ \to TT) = \left(\frac{1}{q^2 - m_V^2 + im_V\Gamma_V}(1-\zeta)\left(g_{\alpha\beta} - \frac{q_\alpha q_\beta}{m_V^2}\right)\right)\overline{U}_{r_4}(k_2, m_T)$$
$$\times \gamma^\beta\left(g_V^i + g_A^i\gamma^5\right)V_{r_3}(k_1, m_T)\overline{V}_{r_2}(p_2, m_\mu)\gamma^\alpha\left(g_V^j + g_A^j\gamma^5\right)U_{r_1}(k_1, m_\mu), \qquad (5)$$

donde Γ_V es la anchura total de decaimiento de los bosones de norma masivos, ζ es el parámetro de norma y g_V^i, g_A^i son los acoplamientos vectorial y axial, respectivamente. Finalmente, la metodología implementada para calcular la amplitud al cuadrado es através de la paquetería especializada en física de partículas, en concreto, la paquetería *Feyncalc* implementado en el ambiente de *Mathematica*. Con esta información, la expresión para la sección eficaz es dada como

$$\sigma_{total}(\mu^-\mu^+ \to \overline{T}T) = \sigma_\gamma^{TT} + \sigma_Z^{TT} + \sigma_{Z'}^{TT} + \sigma_{\gamma ZZ'}^{TT}, \qquad (6)$$

siendo

$$\sigma_\gamma^{TT} = \frac{g_{\mu\mu\gamma}^2\lambda}{12\pi s^2}\left(\left(g_A^{TT\gamma}\right)^2\lambda^2 s + \left(g_V^{TT\gamma}\right)^2\left(6m_T^2 + \lambda^2 s\right)\right), \qquad (7)$$

$$\sigma_Z^{TT} = \frac{g_{TTZ}^2\lambda\left(6m_T^2 + \lambda^2 s\right)}{12\pi\left(m_Z^4 + m_Z^2(\Gamma_Z - 2s) + s^2\right)}\left(\left(g_V^{\mu\mu Z}\right)^2 + \left(g_A^{\mu\mu Z}\right)^2\right), \qquad (8)$$

$$\sigma_Z^{TT} = \frac{g_{TTZ'}^2\lambda^3}{12\pi\left(m_{Z'}^4 + m_{Z'}^2(\Gamma_{Z'} - 2s) + s^2\right)}\left(\left(g_V^{\mu\mu Z'}\right)^2 + \left(g_A^{\mu\mu Z'}\right)^2\right), \qquad (9)$$

y $\sigma_{\gamma ZZ'}^{TT}$ es el término de interferencia.

RESULTADOS

Las expresiones que describen las secciones eficaces dependen de algunos parámetros libres, en concreto, estos parámetros son: la escala de energía f que varía en el intervalo 1 TeV≤ f ≤ 2TeV [4,12], $tan\beta = 3$ rad (formado a partir de los valores de expectación del bosón de Higgs) [4,5,6], $y_1 = 0.61$, $y_2 = 0.84$ e $y_3 = 0.35$ [5,6], y la energía de centro de masa se toma el valor reportado por [13]. También, se toman diferentes valores para la escala de energía F: la primera como 7 TeV y la segunda como 8 TeV.

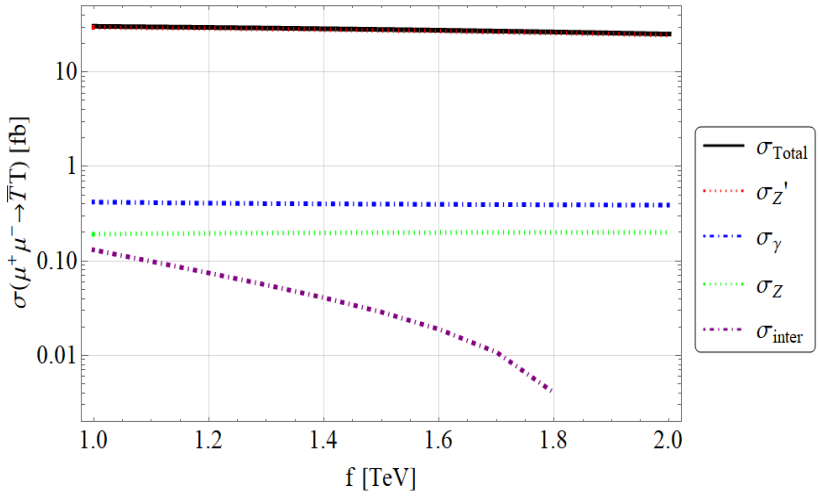


Figura 2. La sección eficaz de producción $\sigma_{total}(\mu^-\mu^+ \to V \to TT)$ con $V = \gamma, Z, Z'$ como función de f para $F = 7$ TeV.

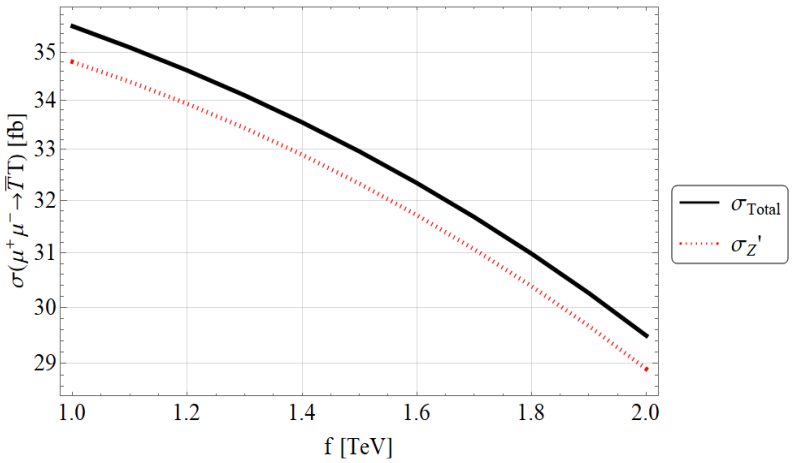


Figura 3. La sección eficaz de producción $\boldsymbol{\sigma_{total}(\mu^-\mu^+ \to V \to \bar{T}T)}$ con $\boldsymbol{V = \gamma, Z, Z'}$ como función de $\boldsymbol{f}$ para $\boldsymbol{F = 8}$ TeV.

En la Figura 2 se muestran las gráficas de la sección eficaz total $\boldsymbol{\sigma_{total}(\mu^-\mu^+ \to \bar{T}T)}$ de la colisión $\boldsymbol{\mu^-\mu^+ \to Y \to \bar{T}T}$ con $\boldsymbol{Y = \gamma, Z, Z'}$ con $\boldsymbol{F = 7}$ TeV. La sección eficaz total toma valores de $\boldsymbol{30.57}$ fb hasta $\boldsymbol{25.39}$ fb en el rango de energía estudiado. Por otra parte, se observa que el proceso $\boldsymbol{\mu^-\mu^+ \to Z' \to TT}$ es el de mayor contribución, siendo del orden de $\boldsymbol{10^1}$ fb. El proceso subdominante es para $\boldsymbol{\mu^-\mu^+ \to Z' \to \bar{T}T}$, el cual toma valores de $\boldsymbol{0.42}$ fb hasta 0.39 fb; mientras que la contribución más suprimida corresponde al proceso $\boldsymbol{\mu^-\mu^+ \to Z \to \bar{T}T}$. Por último, la estimación para el término de interferencia toma valores muy pequeños en comparación con las otras contribuciones en el intervalo de [1,1.8] TeV, mientras que los valores restantes de $\boldsymbol{f}$ se tiene interferencia destructiva, siendo del orden de $\boldsymbol{10^{-2}}$ fb. Con respecto a la Figura 3, se muestra el comportamiento de la sección eficaz para $\boldsymbol{F = 8}$ TeV. Cabe resaltar que las contribuciones que surgen de $\boldsymbol{\gamma}$ y $\boldsymbol{Z}$ no dependen de la escala de nueva energía $\boldsymbol{F}$, por consiguiente, sus valores estimados se mantienen iguales. El cambio surge para la contribución mediada por el bosón neutro $\boldsymbol{Z'}$, obteniendo una aportación de $\boldsymbol{34.79}$ fb hasta $\boldsymbol{28.92}$ fb.

CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudió la sección eficaz de producción del quark top pesado $\boldsymbol{T}$ a nivel de árbol mediada por bosones neutros en el marco del modelo BLH. Los resultados obtenidos para la producción par de quarks pesados $\boldsymbol{T}$ a través de los procesos $\boldsymbol{\mu^+\mu^- \to \gamma, Z, Z' \to \bar{T}T}$, se encuentra que sección eficaz dominante surge para la contribución del bosón $\boldsymbol{Z'}$, siendo del orden de $\boldsymbol{10^1}$ fb en todo el rango de energía estudiado. Con esto podemos resaltar el papel fundamental del bosón $\boldsymbol{Z'}$ en este proceso, aumentando la rica fenomenología de esta partícula. Además, estos resultados nos permiten expandir nuestro entendimiento de estas partículas y ofrece una vía para estudios de efectos de nueva física, pues estamos tratando de partículas nuevas en un contexto de modelos de extensión.

BIBLIOGRAFÍA

1. E. Aliu et al. [K2K], Phys. Rev. Lett.94, 081802 (2005).
2. Y. Ashie et al. [Super-Kamiokande], Phys. Rev. D71, 112005 (2005).
3. M. Schmaltz, D. Stolarski, J. Thaler, JHEP 1009, 018 (2010).
4. P. Kalyniak, T. Martin and K. Moats, Phys. Rev. D91, 013010 (2015).
5. E. Cruz-Albaro, A. Gutiérrez-Rodríguez, Eur. Phys. J. Plus 137, 1295 (2022).
6. J. M. Martínez-Martínez, A. Gutiérrez-Rodríguez, E. Cruz-Albaro and M. A. Hernández-Ruíz, Chin. Phys. C49, 073101 (2025).

7. M. Buchkremer, G. Cacciapaglia, A. Deandrea, and L. Panizzi, Nuclear Physics B 876, 376-417 (2013).
8. R. Benbrik, M. Berrouj, M. Boukidi, A. Habjia, E. Ghourmin, and L. Rahili, Physics Letters B 843, 10 (2023).
9. Tumasyan, A., Adam, W. et al. (CMS collaboration), J. High Energ. Phys. 2023, 20 (2023).
10. G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), Phys. Rev. D105, 092012 (2022).
11. Michael E. Peskin and D. V. Schroeder, “An introduction to quantum field theory”, Addison-Wesley P. C., 1996.
12. S. Godfrey, T. Gregoire, P. Kalyniak, T. A. W. Martin and K. Moats, JHEP04, 032 (2012).
13. C. Accettura, D. Adams, R. Agarwal, C. Ahdida, C. Aimè, N. Amapane, D. Amorim, P. Andreetto, F. Anulli and R. Appleby et al., Eur. Phys. J. C83, 864 (2023). [erratum: Eur. Phys. J. C84, 36 (2024)].

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA NO-POTABLE EN LABORATORIO APLICANDO ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD: RESULTADOS PRELIMINARES

Brenda Yadira Troncoso Bernal[1], Sonia Azucena Saucedo Anaya[2], Raúl Alberto Reyes Villagrana[1,3]

[1]Unidad Academica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia UAZ, [2]Unidad Académica de Ciencias Nucleares UAZ, [3]IxM de la SECIHTI.

btroncoso@uaz.edu.mx, ssaucedo@uaz.edu.mx, rreyes@uaz.edu.mx, rareyesvi@secihti.mx

RESUMEN

El agua es el recurso más importante que poseemos para el desarrollo de la vida en la Tierra, ya que gracias a ella pueden llevarse a cabo procesos fundamentales para los seres vivos, tales como la fotosíntesis, la respiración celular y la regulación térmica. Sin embargo, a lo largo de la historia, la humanidad ha hecho uso de este recurso de forma indiscriminada, lo que ha provocado que en la actualidad existan comunidades marginadas que no cuentan con el servicio básico de agua. Para solucionar este tipo de problemas se han desarrollado distintas estrategias para la captación de agua, como la recolección de lluvia, la extracción subterránea y la cosecha de agua. No obstante, además de obtener el recurso hídrico, es necesario garantizar su pureza mediante la eliminación de contaminantes y microorganismos. De manera particular, el caso de estudio es el estado de Zacatecas, una región semiárida que presenta diversos problemas en torno al recurso hídrico, tales como escasez, sobreexplotación de acuíferos y falta de infraestructura eficiente para el abastecimiento y saneamiento. En este trabajo se presenta un estudio sobre el tratamiento de agua no potable aplicando ultrasonido de alta intensidad. Cuyo objetivo es cuantificar la eficiencia de la técnica de cavitación acústica modulando el tiempo de aplicación. La cavitación acústica es un fenómeno que ocurre cuando un fluido es sometido a un campo ultrasónico de alta intensidad y consiste en la generación, crecimiento e implosión de microburbujas, lo cual libera grandes cantidades de energía que producen presiones muy altas, un aumento drástico de temperatura y el rompimiento de los puentes de hidrógeno, favoreciendo la generación de radicales libres y generando efectos fisicoquímicos intensos. Se recolectó la muestra de agua no potable del arroyo Talamantes, ubicado en el parque científico y tecnológico QUANTUM, en Zacatecas capital. La temperatura de recolección fue de 17°. La muestra se mantuvo en reposo dentro de un recipiente de plástico dentro del laboratorio de energía. La muestra de agua se dividió en varias muestras de 200 ml en recipientes de plástico. Se tomó una muestra de control y el tratamiento de las muestras se ultrasonicaron por triplicado, utilizando un ultrasonicador tipo baño ultrasónico de 3 litros de capacidad, potencia acústica de 120 W, frecuencia de trabajo de 40 kHz y presión de 1000 Pa, además de una modulación térmica de 300 W. El tratamiento fue por el método de transmisión, utilizando agua purificada como sistema embebido. Los tiempos de ultrasonicación fueron de 15 min., 30 min., 45 min. y 60 min. Se utilizaron tiras activas para detección de compuestos como nitratos, nitritos, cloro, hierro, cobre, entre otros. Así también, se midió el pH de cada muestra ultrasonicada. Los resultados describieron que la muestra de control presentó residuos de metales como cloruro de amonio y bromo. Los tiempos de tratamiento aplicados mostraron que la modulación a 60 minutos eliminó por completo los materiales detectados. Por lo que se puede decir que la cavitación acústica es un método alternativo para el tratamiento del agua no potable bajo condiciones controladas.

INTRODUCCIÓN

La limpieza del agua es un tema de gran relevancia a nivel mundial, ya que se trata de un recurso finito y, al mismo tiempo, uno de los más utilizados. Por ello, su tratamiento para garantizar un uso posterior seguro es fundamental. Dependiendo de la contaminación que esté presente y el uso que se le va a dar, es el método de limpieza que se a utilizar, es decir, el método de purificación de agua potable es diferente al método de tratamiento de aguas residuales (Rojas, 2002; Valdez, 2003).

El tratamiento de aguas residuales se enfoca en la eliminación de contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua utilizada en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Para ello, se emplean etapas que incluyen tratamiento preliminar (remoción de sólidos grandes), tratamiento primario (sedimentación y flotación), tratamiento secundario (biológico) y tratamiento terciario (pulido del efluente y eliminación de nutrientes). Además, se incorpora la desinfección y el manejo de lodos. Su finalidad principal es proteger el medio ambiente y la salud pública, permitiendo en algunos casos el rehúso del agua en actividades agrícolas, industriales o recarga de acuíferos, dependiendo del grado de tratamiento alcanzado (Rojas, 2002; Valdez, 2003).

En contraste, el tratamiento de agua potable tiene como propósito producir agua segura para el consumo humano, partiendo generalmente de fuentes naturales superficiales o subterráneas. Este proceso incluye etapas como la coagulación, floculación, sedimentación, filtración (por arena, carbón o membranas) y desinfección final, con estrictos controles sobre patógenos, turbidez, compuestos orgánicos e inorgánicos. A diferencia del tratamiento de aguas residuales, en el tratamiento de agua potable no se implementan procesos biológicos, sino fisicoquímicos. La principal diferencia radica en que, mientras el tratamiento de aguas residuales busca mitigar la contaminación y reutilizar el recurso, el tratamiento de agua potable busca eliminar cualquier riesgo microbiológico o químico que pueda afectar directamente la salud humana (Rojas, 2002; Valdez, 2003).

Debido a la importancia de estos tipos de tratamiento, diversos estudios han evaluado distintos métodos de tratamiento de agua y aumentar la eficiencia de los procesos convencionales. Entre estas alternativas destaca el uso de ultrasonido de alta intensidad para la desinfección y tratamiento del agua, ya que puede eliminar microorganismos sin necesidad de usar químicos, mediante efectos físicos y químicos generados por la cavitación acústica.

MARCO TEÓRICO

Agua

El agua es una molécula de estructura simple, está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, los cuales están unidos a través de enlaces covalentes altamente estables. Esta molécula presenta polaridad porque el átomo de oxígeno, al ser altamente electronegativo, atrae con mayor intensidad a los electrones en comparación con los átomos de hidrógeno. Como resultado, la densidad electrónica se concentra principalmente en torno al átomo de oxígeno, mientras que cerca de los átomos de hidrógeno predomina una carga parcial positiva. Esta polaridad en la molécula favorece la formación de enlaces intermoleculares conocidos como puentes de hidrógeno, en los cuales el hidrógeno de una molécula se ve atraído por el oxígeno de otra, lo que proporciona al agua muchas de sus propiedades distintivas. Como consecuencia, el agua presenta una serie de propiedades físicas y químicas que la distinguen de otras sustancias y que resultan fundamentales para numerosos procesos naturales y tecnológicos.

Aunque el agua es una sustancia que no tiene sabor, color, ni olor, para obtenerla en estado químicamente puro, es necesario someterla a procesos físicos de purificación, esto debido a que posee una notable capacidad de disolver una gran variedad de compuestos, incluyendo gases, sales y compuestos orgánicos e inorgánicos.

Los puentes de hidrógeno desempeñan un papel fundamental en el comportamiento físico del agua. En estado sólido, estos enlaces se organizan en una estructura cristalina abierta del tipo tetraédrico donde cada molécula de agua se encuentra rodeada por otras cuatro, estableciendo una red tridimensional. Sin embargo, cuando aumenta la temperatura, esta red cristalina se rompe y las moléculas quedan más cerca entre sí, lo que da como resultado una mayor densidad en el estado líquido (Carbajal, 2012; Zambrana, 2009).

Debido a sus propiedades físicas y químicas, el agua puede interactuar con diversos tipos de contaminantes. Como consecuencia de estas interacciones, se han desarrollado distintas tecnologías destinadas a remover dichas sustancias y mejorar la calidad del agua.

Ultrasonido

Para comprender el funcionamiento del ultrasonido es necesario considerar primero la naturaleza de las ondas mecánicas. Estas son perturbaciones que se transmiten a través de un material o sustancia, como el aire, el agua o los sólidos. Estas ondas requieren un medio físico para propagarse, lo que impide su transmisión en el vacío. Al desplazarse por dicho medio, las partículas que lo componen se mueven y la forma en que lo hacen depende de las propiedades del mismo medio. Si el movimiento de las partículas ocurre en dirección perpendicular a la trayectoria de la onda, se trata de ondas transversales, por otro lado, si el desplazamiento ocurre en la misma dirección en la que la onda se propaga, se denominan ondas longitudinales. Las ondas acústicas son ondas mecánicas que comúnmente son longitudinales (Young, 2009; Leighton, 2007; Humphrey, 2007).

Las ondas acústicas pueden clasificarse de acuerdo con su frecuencia. El espectro acústico se clasifica en varios rangos: infrasonido, sonido audible, ultrasonido e hipersonido. Las ondas infrasónicas poseen frecuencias menores a 20 Hz, por lo que no pueden ser percibidas por el oído humano. Este tipo de ondas se utiliza en aplicaciones como la detección de terremotos y erupciones volcánicas, la exploración de formaciones geológicas y yacimientos petroleros subterráneos, así como el análisis de la actividad cardíaca. El rango audible comprende frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz, y es todo lo que el ser humano puede escuchar. El ultrasonido, en cambio, abarca frecuencias superiores a los 20 kHz y tampoco es perceptible por el ser humano. Finalmente, el hipersonido incluye frecuencias mayores a 1 GHz.

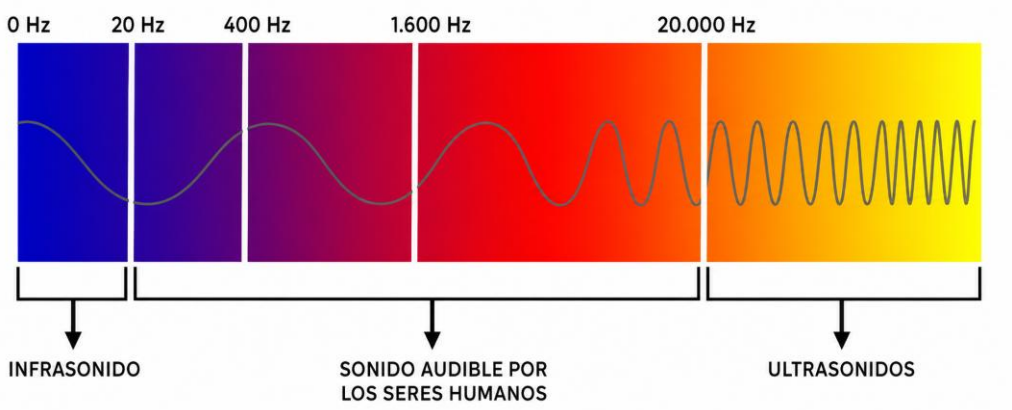


Figura 1: Espectro de frecuencias de las ondas acústicas.

Al propagarse por un medio, una onda ultrasónica transporta energía cinética (movimiento de las partículas) y energía potencial (compresión del medio). La intensidad del ultrasonido describe la cantidad de energía que fluye a través de un área determinada y depende de la presión acústica y la impedancia del medio. Por otra parte, la potencia acústica se refiere a la cantidad de energía en forma de ondas acústicas emitida por una fuente por unidad de tiempo, mientras que la impedancia es la resistencia que ejerce un medio a la propagación de las ondas acústicas (Leighton, 2007; Humphrey, 2007).

Dependiendo de la intensidad utilizada, las aplicaciones del ultrasonido se dividen generalmente en dos categorías según su intensidad: ultrasonido de baja intensidad y ultrasonido de alta intensidad. Por lo regular, el ultrasonido de baja intensidad transmite energía que suele ser menor a 0.1 W/cm^2 y se utiliza principalmente para obtener información del medio por el cual se propaga sin modificarlo. Sus aplicaciones típicas se encuentran en áreas de diagnóstico médico no invasivo y tratamiento médico, ya que estimula la regeneración de tejidos y la cicatrización de fracturas.

Por otro lado, el ultrasonido de alta intensidad, también llamado ultrasonido de alta potencia tiene como objetivo generar cambios permanentes en el medio a través de fenómenos no lineales como la cavitación acústica. Por lo general se considera que el ultrasonido de alta intensidad comienza a partir de valores que oscilan entre 0.1 W/cm^2 y 1 W/cm^2 dependiendo del medio en el que se

aplica. El ultrasonido de alta intensidad tiene una amplia gama de aplicaciones; por ejemplo, en medios líquidos permite procesos como la limpieza por ultrasonido, la emulsificación y la dispersión de sustancias. También tiene otras aplicaciones como la desgasificación, la extracción de componentes celulares, reacciones químicas inducidas por ultrasonido, entre otras.

Entre los fenómenos más importantes asociados al ultrasonido de alta intensidad se encuentra la cavitación acústica, considerada el principal mecanismo responsable de muchos de los efectos observados en medios líquidos. Debido a su relevancia para el tratamiento de agua, este fenómeno se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

Cavitación acústica

La cavitación acústica es una de las principales consecuencias fenomenológicas del ultrasonido de alta intensidad. Este fenómeno consiste en la generación, crecimiento e implosión de microburbujas en líquidos, lo cual puede liberar grandes cantidades de energía. Como resultado de este colapso se producen diversos efectos físicos y químicos que son responsables de muchas de las aplicaciones del ultrasonido en medios líquidos.

Entre los efectos más importantes asociados a la cavitación acústica se encuentran la generación de altas temperaturas y presiones locales, las cuales pueden alcanzar aproximadamente 5000 K y hasta 1000 atmósferas durante el colapso de las burbujas. Asimismo, se producen microchorros y ondas de choque capaces de romper estructuras celulares, descomponer contaminantes o modificar la estructura de partículas presentes en el medio. De igual manera, el colapso de las burbujas puede inducir la disociación de moléculas de agua y favorecer la formación de radicales libres, principalmente radicales hidroxilos y radicales de hidrógeno, los cuales poseen una elevada reactividad química y pueden desencadenar diversas reacciones en el sistema (Leighton, 2007; Humphrey, 2007).

Debido a estos efectos, la cavitación acústica ha despertado un interés considerable en aplicaciones relacionadas con el tratamiento de aguas residuales y la purificación de agua potable. Uno de los principales beneficios de este fenómeno es la eliminación de contaminantes orgánicos. Cuando se generan radicales debido a la cavitación, como el hidroxilo que es una sustancia muy reactiva, estas pueden llegar a romper las moléculas grandes de contaminantes como los fenoles o los colorantes en compuestos más simples o incluso en dióxido de carbono y agua.

Además de la degradación de contaminantes químicos, la cavitación acústica puede contribuir a la destrucción de microorganismos. La cavitación puede llegar a romper las paredes celulares de bacterias y otros organismos como algas, nematodos y hongos. Por otra parte, la cavitación puede emplearse para mejorar la eficiencia de otras etapas del tratamiento de agua. Entre los efectos reportados se encuentran la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y el incremento en la formación de peróxido de hidrógeno, factores que pueden favorecer procesos posteriores de oxidación y tratamiento.

Asimismo, la cavitación acústica puede utilizarse en combinación con otras tecnologías de tratamiento. En estos casos puede ser de utilidad para eliminar surfactantes (como detergentes) y compuestos difíciles como el bisfenol A e hidrocarburos aromáticos. Además, puede llegar a eliminar el amoníaco y reducir el hierro disuelto. Inclusive se puede llegar a usar para acelerar la degradación de colorantes.

Debido al potencial de estas aplicaciones, la cavitación acústica se ha convertido en una alternativa de interés para el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua más eficientes y con un menor uso de agentes químicos. Con base en estos antecedentes, en el presente trabajo se empleó ultrasonido de alta intensidad para evaluar de manera preliminar su efecto sobre diferentes parámetros de calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de este trabajo consistió en una fase de pruebas preliminares, cuyo objetivo principal fue familiarizarse con el equipo de cavitación acústica y explorar de manera cualitativa el efecto del ultrasonido sobre la calidad del agua. Para ello, se realizaron actividades de muestreo, aplicación de tratamientos ultrasónicos y evaluación de diversos parámetros fisicoquímicos mediante mediciones directas y tiras reactivas comerciales.

Recolección de muestras

Como primera etapa de estudio, se llevó a cabo una recolección de agua en el arroyuelo Talamantes, ubicado en Ciudad Quantum, en Zacatecas capital. Inmediatamente después de la toma de muestra se registraron la temperatura del agua y el pH *in situ,* con el fin de contar con una referencia de las condiciones iniciales del cuerpo de agua en el momento del muestreo. Posteriormente, fracciones de la muestra recolectada se utilizaron en el laboratorio para la aplicación de los tratamientos por ultrasonido y la evaluación preliminar de la calidad del agua mediante tiras reactivas comerciales.

Aplicación de tratamiento por cavitación acústica

Una vez realizada la etapa de muestreo, se procedió a la aplicación de tratamientos mediante la aplicación de ultrasonido de alta intensidad usando el método de transmisión, empleando un baño ultrasónico marca Creworks, con una capacidad de 3 litros, una potencia de 120 W, frecuencia de 40 kHz, presión de 1000 Pa y potencia de calentamiento de 300 W. Para cada condición experimental se trabajó con un volumen de aproximadamente 1200 ml. de agua purificada en el baño ultrasónico.

Con el fin de establecer una referencia para las comparaciones posteriores, se preparó una muestra de control que no fue sometida a ultrasonido. Sobre esta muestra se midieron el pH y la temperatura, y se evaluó la calidad del agua mediante tiras reactivas comerciales (*test strips*) marca Umelecoa para estimar, de manera cualitativa, distintos parámetros de calidad de agua de acuerdo con las escalas proporcionadas por el fabricante.

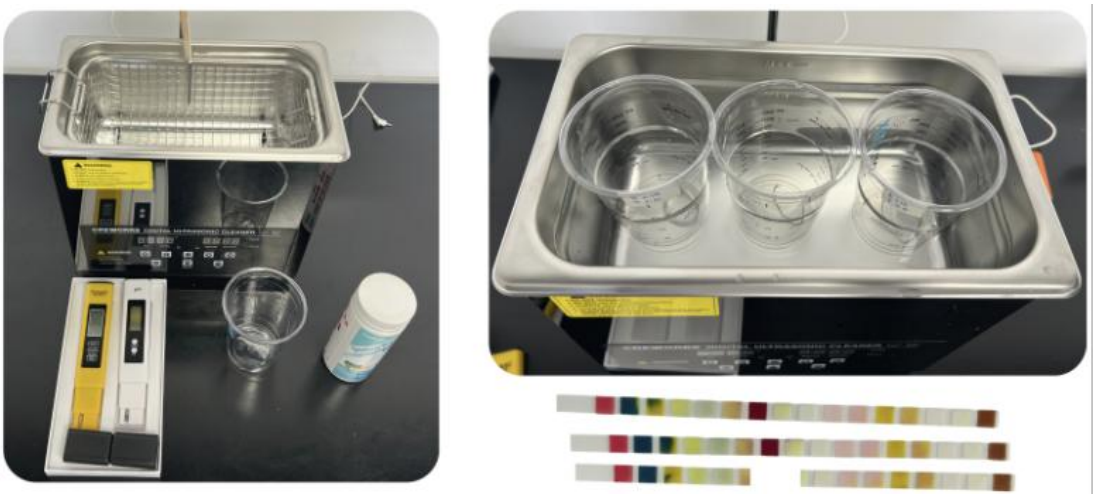


Figura 2: Montaje experimental para el tratamiento de agua.

Posteriormente, se aplicaron tratamientos por ultrasonido combinando diferentes tiempos de exposición y diferentes condiciones de temperatura del baño ultrasónico. Se consideraron los siguientes tiempos de exposición de 15, 30, 45 y 60 minutos, así como cuatro condiciones de temperatura correspondientes a calefactor apagado (T=0), T=30 °C, T=50 °C, T = 70 °C. La combinación de estos factores dio lugar a un total de 16 condiciones experimentales.

Para cada condición experimental se trabajó con un volumen aproximado de 170 mL de agua, el cual fue expuesto al ultrasonido bajo las condiciones previamente establecidas. Al finalizar cada tratamiento se registraron nuevamente la temperatura y el pH de la muestra, y se realizó una segunda evaluación mediante tiras reactivas comerciales.

Las mediciones obtenidas permitieron realizar una primera aproximación cualitativa al efecto del ultrasonido y de la temperatura sobre los parámetros de calidad del agua evaluados. Asimismo, esta etapa sirvió como proceso de familiarización con el equipo experimental y como base para el diseño de experimentos posteriores orientados a evaluar con mayor detalle los efectos de la cavitación acústica sobre la calidad del agua.

RESULTADOS

Cada condición experimental, definida por la combinación de tiempo y temperatura de operación del baño ultrasónico, se repitió tres veces, utilizando tres vasos independientes (v1, v2 y v3), con el fin de evaluar la variabilidad del proceso. Los parámetros analizados fueron: sólidos disueltos totales (TDS), pH (medido con un sensor digital), temperatura inicial y final, así como los indicadores provistos por las tiras reactivas comerciales.

Parámetros que no mostraron variación

La mayoría de los parámetros evaluados mediante tiras reactivas permanecieron constantes en todas las condiciones experimentales analizadas. Entre ellos se encuentran la dureza total (GH = 120), cloro libre (0), hierro (0), cobre (0), plomo (0), nitratos (25), nitritos (1), monopersulfato (0), cloro total (0), fluoruro (0), ácido cianúrico (0), alcalinidad total (180) y carbonatos (240). Asimismo, el pH estimado mediante tiras reactivas permaneció en un valor aproximado de 9. La ausencia de variación en estos parámetros indica que el tratamiento por ultrasonido en las condiciones preliminares empleadas no produjo cambios detectables por el método utilizado. Sin embargo, también es posible que algunos de estos parámetros hayan experimentado modificaciones menores que no pudieron ser detectadas debido a la limitada sensibilidad de las tiras reactivas utilizadas.

Parámetros que mostraron sensibilidad al tratamiento

A diferencia de los parámetros anteriores, dos indicadores colorimétricos mostraron cambios asociados a las condiciones de tratamiento: cloruro de amonio y bromo. Para tiempos de exposición de 15, 30 y 45 minutos y con el baño ultrasónico operando sin calefacción (T=0), ambos parámetros registraron valores de 5 y 0.5, respectivamente. Sin embargo, al incrementar el tiempo de exposición a 60 minutos, los dos indicadores desaparecieron completamente. A una temperatura de operación de 30 °C se observó un comportamiento similar: los valores se mantuvieron para 15 y 30 minutos, mientras que para 45 minutos el bromo disminuyó a cero y para 60 minutos ambos parámetros volvieron a desaparecer. En condiciones de mayor temperatura (50 °C y 70 °C), tanto cloruro de amonio como bromo permanecieron en cero para todos los tiempos evaluados. Este comportamiento sugiere que la cavitación acústica favorece la degradación, oxidación o volatilización de compuestos relacionados con el amonio y especies oxidantes detectadas por las tiras reactivas.

Mediciones con pH y TDS

El pH medido con el sensor digital mostró variaciones entre condiciones, a diferencia del pH reportado por las tiras reactivas. Esto confirma que el equipo colorimétrico no posee suficiente resolución para detectar cambios sutiles en el pH, mientras que el medidor digital sí permite observar el efecto del ultrasonido sobre el pH de la muestra. Por otro lado, los valores de TDS mostraron variación entre tratamientos, indicando posibles cambios en la composición química del agua que afectan la cantidad de sustancias disueltas.

Finalmente, la repetibilidad observada entre las réplicas (v1, v2 y v3) fue adecuada, con diferencias mínimas entre mediciones bajo una misma condición experimental, lo cual valida el procedimiento experimental empleado.

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares permitieron verificar que el sistema experimental funciona de manera adecuada y que el procedimiento es reproducible, ya que las repeticiones mostraron resultados consistentes.

Se observó que la mayoría de los parámetros medidos con tiras reactivas no presentaron cambios bajo las condiciones evaluadas, lo que puede indicar que el ultrasonido no genera efectos detectables en estos compuestos o que el método utilizado no tiene la sensibilidad suficiente.

Sin embargo, el cloruro de amonio y el bromo sí mostraron cambios claros, ya que sus concentraciones disminuyeron con el tiempo de exposición y la temperatura, hasta desaparecer en ciertas condiciones. Esto indica que algunos compuestos sí son sensibles al tratamiento por cavitación acústica.

En general, estos resultados ayudan a identificar qué parámetros responden al tratamiento y sirven como base para los experimentos posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Rojas, "*Sistemas de tratamientos de aguas residuales*", Gestión integral de tratamiento de aguas residuales", (1 ed., OPS-OMS, Coordinación de proyectos especiales, Colombia, 2002).
2. E. C. Valdez, A. B. Vázquez González, "*Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*", (1 ed., Fundación ICA, AC México, UNAM, México, D.F., 2001).
3. A. Carbajal Azcona, M. González Fernández, "*Propiedades y funciones biológicas del agua*", Agua para la salud, Pasado, Presente y Futuro. M.P. Vaquero, L. Toxqui, Eds. 2012, pp. 33-45.
4. B. G. Marín Zambrana, "*Manual de química del agua: Teoría y práctica*", (1 ed., Ed. UNIMAGDALENA, Colombia, 2009).
5. H. D. Young, R. A. Freedman, F. W. Sears, M. W. Zemansky, *Física Universitaria* (12ª ed., Pearson Educación, vol. 1, México, 2009).
6. T. G. Leighton, "What is ultrasound?", Progress in Biophysics and Molecular Biology, 93 2007, pp. 3-83.
7. V. F. Humphrey, "Ultrasound and matter – Physical interactions", Progress in Biophysics and Molecular Biology, 93, 2007, pp. 195-211.
8. Y. Yao, Y. Pan, S. Liu, "Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review", Ultrasonics Sonochemistry, 62, 2020, pp.104722.
9. A. H. Mahvi, "Applications of ultrasonic technology for water and wastewater treatment", Iranian J. Public Health, Vol. 38, 2, 2009, pp. 1-17.

COMPORTAMIENTO DINÁMICO ACOPLADO DE CUATRO PLACAS FLEXIBLES EN FLUJO DE AIRE CON DISPOSICIÓN EN TANDEM

Juan José Flores Fiallos, Anne Cros

Universidad de Guadalajara
juan.flores9126@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Las oscilaciones inducidas por flujo en placas flexibles empotradas han sido ampliamente estudiadas cuando se considera una sola placa flexible, donde la respuesta dinámica depende principalmente de las propiedades estructurales y de la intensidad del flujo. Sin embargo, cuando varias placas flexibles interactúan entre sí, la respuesta dinámica del sistema puede diferir del comportamiento de una placa individual. En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre las oscilaciones acopladas de cuatro placas flexibles idénticas dispuestas dos detrás de otras dos en un flujo de aire transversal, con el objetivo de analizar cómo la disposición del arreglo y la intensidad del flujo influyen en la respuesta dinámica de las placas. Los experimentos se realizaron en un túnel de viento utilizando placas flexibles de poliéster, empotradas en su extremo superior y libres en el inferior. Las placas se colocaron en dos filas, manteniendo una separación transversal constante y variando la distancia longitudinal entre las placas delanteras y traseras. La velocidad del flujo se incrementó de manera controlada y el movimiento de los extremos libres se registró mediante captura de video. A partir del procesamiento de imágenes se obtuvieron series temporales de posición, las cuales se analizaron mediante transformada de Fourier para determinar la amplitud de oscilación, la frecuencia, la diferencia de fase y la deflexión promedio de cada placa. Para bajas velocidades del flujo, las placas presentan únicamente una deflexión estática. Al superar un valor crítico del número de Cauchy, el sistema entra en un régimen de oscilaciones. En todas las configuraciones estudiadas, las placas dispuestas una al lado de la otra oscilan en oposición de fase, tanto en la fila delantera como en la trasera. Dependiendo de la distancia longitudinal entre filas, se observa que las placas traseras pueden iniciar sus oscilaciones a valores menores del número de Cauchy que las placas delanteras. Asimismo, las placas traseras alcanzan amplitudes de oscilación mayores que las placas delanteras para todas las separaciones consideradas. Las frecuencias de oscilación aumentan con el número de Cauchy y el inicio de las oscilaciones ocurre a valores ligeramente menores que la frecuencia natural de una placa aislada. La deflexión promedio de las placas traseras son menores que la de las placas delanteras. Los resultados muestran que la respuesta dinámica del sistema de cuatro placas flexibles varía con la distancia longitudinal entre placas y con la intensidad del flujo, aún cuando todas las placas son idénticas. Se observan diferencias claras entre la respuesta de las placas delanteras y traseras, particularmente en la amplitud de oscilación y en la deflexión promedio. Estos resultados evidencian la importancia de la disposición en tándem en el comportamiento dinámico del sistema.

INTRODUCCIÓN

La interacción fluido-estructura (FSI) es el estudio del comportamiento de estructuras sometidas a un flujo. Es un fenómeno con relevancia tanto en sistemas biológicos como en aplicaciones de ingeniería. En la naturaleza, la FSI se observa en la vibración y flexión de la vegetación ante la acción del aire o agua, un mecanismo que previene su ruptura [1]. Por lo contrario, en ingeniería se ha utilizado para el desarrollo de generadores de energía limpia. Un ejemplo es el sistema elaborado por [2], donde se utilizan dos placas flexibles idénticas, inmersas en un flujo de aire transversal con parches de material piezoeléctrico adherido sobre la superficie. A diferencia de dicho estudio, el presente trabajo analiza un sistema de cuatro placas flexibles, lo que permite caracterizar fenómenos de interacción colectiva no presentes en sistemas de dos placas. Esta extensión puede aportar información relevante para optimizar futuros generadores de energía basados en múltiples elementos oscilantes. Al alcanzar una velocidad crítica del viento, las placas oscilan, la flexión de las

placas deforma el material piezoeléctrico. Finalmente, la energía mecánica del fluido se convierte en energía eléctrica.

En muchas aplicaciones de ingeniería tradicional, las estructuras se diseñan con una rigidez suficiente para evitar deformaciones significativas bajo carga. Sin embargo, en la naturaleza ocurre lo contrario: los organismos expuestos al viento o al agua tienden a ser flexibles y adaptables [3]. Esta flexibilidad les permite cambiar de forma al ser sometidos a un flujo, reduciendo así el área proyectada perpendicular a la corriente y adoptando formas más aerodinámicas [4]. Este fenómeno, conocido como reconfiguración, provoca que la fuerza de arrastre no crezca con el cuadrado de la velocidad del flujo (como ocurre en cuerpos rígidos), sino de manera más moderada.

TEORÍA

A continuación, se detallan las principales ecuaciones para el estudio de la reconfiguración de placas flexibles en un flujo transversal para la disminución de arrastre de cuerpos flujo abajo.

Reconfiguración: placa flexible en un flujo transversal

La reconfiguración es la deformación estática que experimenta un cuerpo flexible al ser sometido a la acción de un flujo. En este trabajo se estudia una placa flexible empotrada en un extremo y libre en el otro, expuesta a un flujo transversal de velocidad $\boldsymbol{U}$. Debido a la acción del flujo, la placa se flexiona y adopta una configuración más aerodinámica, reduciendo el área efectiva expuesta al flujo y, por consiguiente, la fuerza de arrastre.

Para pequeñas deformaciones, el perfil de la placa puede describirse mediante un modelo basado en la teoría de Euler-Bernoulli. Como demostraron [5] y [6], el equilibrio entre las fuerzas aerodinámicas y la rigidez a la flexión de la estructura conduce a la siguiente ecuación diferencial no lineal que gobierna la forma de la placa:

$$\frac{\partial^3 \theta}{\partial s^3} = -\frac{1}{2}\frac{\rho C_D U^2 \cos^2\theta}{B}, \tag{1}$$

donde θ es el ángulo entre la tangente de la placa y la dirección inicial de la placa, s es una coordenada longitudinal a lo largo de la placa: estas dos cantidades están ilustradas en la figura 1. Además, ρ es la densidad del fluido, C_D es el coeficiente de arrastre de una placa rígida colocada transversalmente al flujo, U es la velocidad del flujo y B es la rigidez a la flexión de la placa.

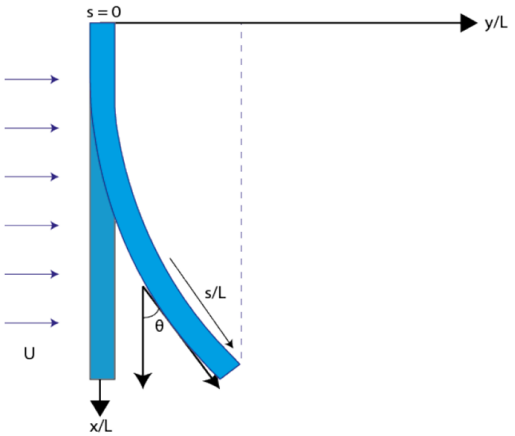


Figura 1. Representación de la flexión de una placa sometida a un flujo de velocidad $\boldsymbol{U}$. Se muestran las cantidades θ y la coordenada curvilínea s.

Disminución del arrastre detrás de un cuerpo:

En estudios sobre la disminución del arrastre detrás de un cuerpo, se ha observado que un cilindro colocado aguas abajo de otro experimenta un arrastre menor debido al déficit de velocidad en la estela del primero [7]. El coeficiente de arrastre C_{Dd} del cilindro flujo abajo, de mismo diámetro D que el cilindro flujo arriba, depende de la distancia longitudinal (x) entre los centros de ambos cilindros. Así que se puede definir la fuerza de arrastre f_D por unidad de longitud como:

$$f_D = \frac{1}{2}\rho U^2 D C_{Dd}(x), \tag{2}$$

donde ρ es la densidad del fluido, U es la velocidad del flujo. Empíricamente se establece que [8].

$$C_{Dd}(x) = C_{D0}\left[1 - \left(\frac{C_{D0}D}{x}\right)^{1/2}\right]^2, \tag{3}$$

donde C_{D0} es el coeficiente de arrastre en flujo uniforme; para un cilindro, $C_{D0} = 1.15$ [7,8].

PARTE EXPERIMENTAL

Los experimentos se realizaron en el túnel de viento del Laboratorio de Dinámica de Fluidos de CUCEI. Un esquema de este túnel se observa en la figura 2. En la sección de pruebas que mide 50 cm x 50 cm x 50 cm, se colocaron cuatro placas de poliéster, las cuales tienen características descritas en la Tabla 1.

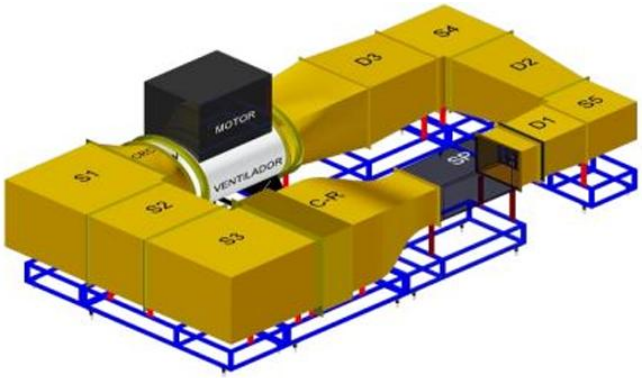


Figura 2. Esquema del túnel de viento del CUCEI.

Tabla 1. Características de las placas utilizadas, H representa el ancho, L la longitud, m_l masa longitudinal, B rigidez en flexión y e el espesor

H (cm)	L (cm)	m_l (kg/m)	B (N.m)	e (mm)
2.0	16.0	0.004775	0.002376	0.156

Las placas fueron colocadas de manera transversal al flujo de aire, pinzadas en sus extremos superiores y libres en sus extremos inferiores como se observa en la figura 3. Para caracterizar el desplazamiento de las placas, se colocaron marcas de color blanco en los extremos inferiores de las placas. Este color nos ayuda a identificar la posición de este punto a lo largo del tiempo, ya que las placas son negras al igual que el fondo de la sección de pruebas del túnel de viento.

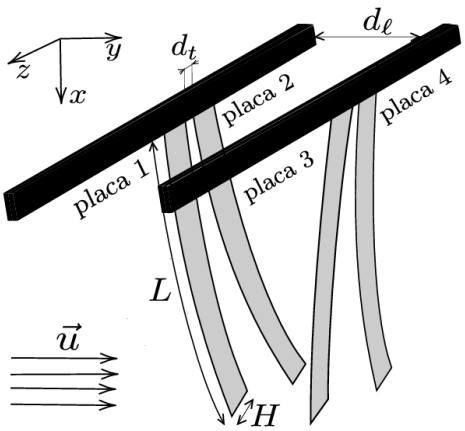
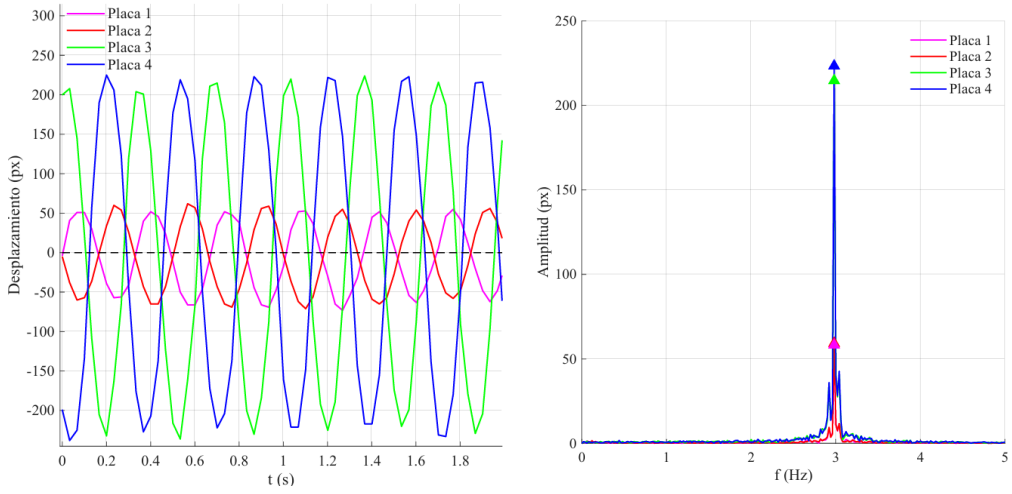


Figura 3. Arreglo experimental de cuatro placas colocadas transversalmente al flujo. Las placas 1 y 2 son las placas delanteras, mientras que la 3 y 4 corresponden a las placas traseras.

Para seguir la posición de los extremos libres de las placas se colocó una cámara en la parte inferior de la sección de pruebas del túnel de viento para analizar la deflexión de las placas. Una vez preparado el montaje, se encendió el equipo y se aumentó progresivamente la velocidad del aire, la cual se determina mediante la siguiente ecuación $\boldsymbol{v = 0.5154 f_c - 0.2823}$, donde $\boldsymbol{f_c}$ es la frecuencia de control del túnel de viento que el experimentador fija.

Las placas flexibles se montaron en la sección de pruebas del túnel de viento, cuidando su alineación respecto al flujo. Se registró inicialmente su posición con el túnel apagado y posteriormente se realizaron ensayos incrementando la frecuencia de control en pasos de 0.25 Hz, capturando el movimiento mediante una cámara a 29.97 cuadros por segundo. El procedimiento se repitió para distancias de separación entre placas delanteras y traseras $\boldsymbol{d_\ell}$ = 3, 4, 5, 6 y 7 cm, mientras que la distancia de separación de las placas una al lado de la otra fue constante e igual a $\boldsymbol{d_t = 4}$ mm. Finalmente, las imágenes obtenidas fueron procesadas en Matlab para cuantificar la deflexión de las placas mediante un procesamiento de imágenes. El programa identificó, cuadro por cuadro, los píxeles que superaban un umbral crítico para detectar las marcas de los extremos libres, generando series temporales de posición, como se observa en la figura 4(a). Con estos datos se construyeron diagramas espacio-temporales y, tras extraer la posición de los extremos libres, se analizó una transformada de Fourier cuyo espectro reveló que el movimiento es armónico (ver figura 4(b)).



(a) (b)

Figura 4. (a) Señal temporal de las cuatro placas para $\boldsymbol{d_\ell}$ = 6 cm y $\boldsymbol{\eta}$ = 1.54. (b) Espectro de Fourier.

Finalmente, se pudo determinar las siguientes características de las placas:

- La deflexión promedio $\boldsymbol{y_{prom}}$ de las placas. Esta cantidad es evaluada haciendo un promedio temporal de las posiciones en los extremos libres de las placas restada la posición de la placa sin flujo de aire.
- Amplitud de oscilación $\boldsymbol{A}$. Este valor se estima a partir de la altura del pico del espectro de Fourier.
- La frecuencia de oscilación $\boldsymbol{f}$. Este valor se indica en la abscisa correspondiente al pico en el espectro de Fourier.
- La fase entre las placas $\boldsymbol{\Delta\phi}$. Este valor está calculado a partir del coeficiente complejo de la transformada de Fourier que corresponde a la frecuencia de oscilación de las placas. Se determinará una diferencia de fase entre placas lado al lado (1 y 2 por una parte, 3 y 4 por otra), así como una diferencia de fase entre placa colocadas en tándem (1 y 3 por una parte, 2 y 4 por otra).

RESULTADOS

Deflexión promedio

Por claridad en la visualización de los resultados, se presentan únicamente los casos correspondientes a dos distancias longitudinales: $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm y $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm, aunque el estudio experimental se haya realizado para un total de cinco distancias ($\boldsymbol{d_\ell} = 3$, 4, 5, 6 y 7 cm).

Se observó que, para todas las distancias $\boldsymbol{d_\ell}$, la posición promedio de la placa es flexionada. La figura 5 muestra la deflexión promedio $\boldsymbol{y_{prom}(L)/L}$ de los extremos libres de las dos placas delanteras para $\boldsymbol{d_\ell}$ = 4 cm (cuadrados azules) y $\boldsymbol{d_\ell}$ = 7 cm (cuadrados naranjas) en función de $\boldsymbol{\eta}$. Estas dos series fueron comparadas con la deflexión teórica de una placa aislada en el flujo de aire dada por la ecuación (1) que está representada por la curva negra punteada. Se observa que las reflexiones experimentales son por debajo de la predicción teórica. Sin embargo, si se toma en cuenta el propio peso de las placas como lo hicieron [9], entonces la curva teórica describe correctamente el comportamiento de las placas delanteras. Como lo esperado en nuestro caso, como las placas cuelgan, el peso de la placa provoca una deflexión menor.

La deflexión de las placas traseras (asteriscos azules para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm y naranjas para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm) siempre es menor que la deflexión de las placas delanteras, como está esperado por el efecto de apantallamiento (ver ecuación (3)). Sin embargo, es sorprendente observar que la deflexión para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm es mayor que la deflexión para para $\boldsymbol{d_\ell} = 6$ cm. Las líneas continuas azules y naranja muestran la predicción de las deflexiones promedio de las placas traseras (combinación de la ecuación (3) en la ecuación (1)). Observamos que el modelo propuesto para las placas traseras no se ajustan a los resultados experimentales. Esto puede ser ocasionado por el contacto físico que ocurre entre las placas delanteras y traseras; el valor de $\boldsymbol{\eta}$ al cual eso ocurre se indica en la figura 5 por medio de la línea vertical punteada azul. También la discrepancia puede ser debida a un efecto de succión mencionado por [7] y no tomado en cuenta en la ecuación (1).

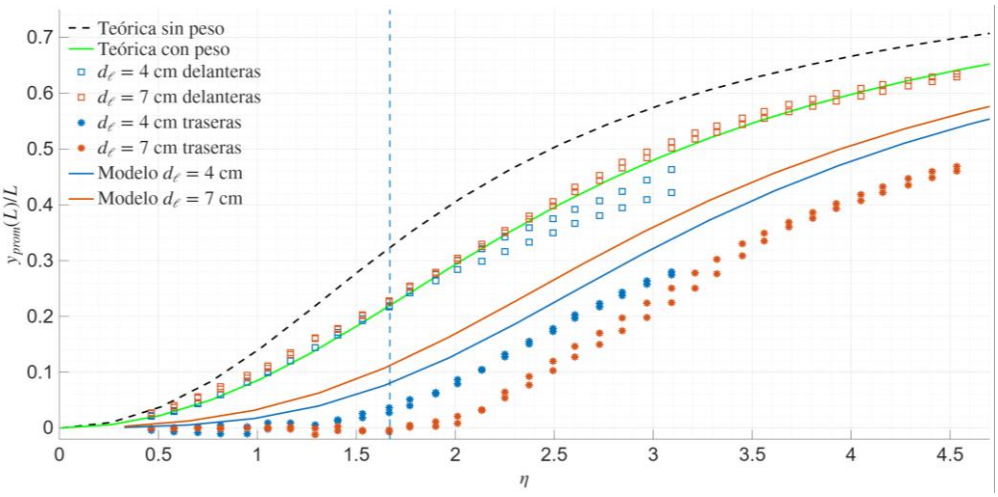
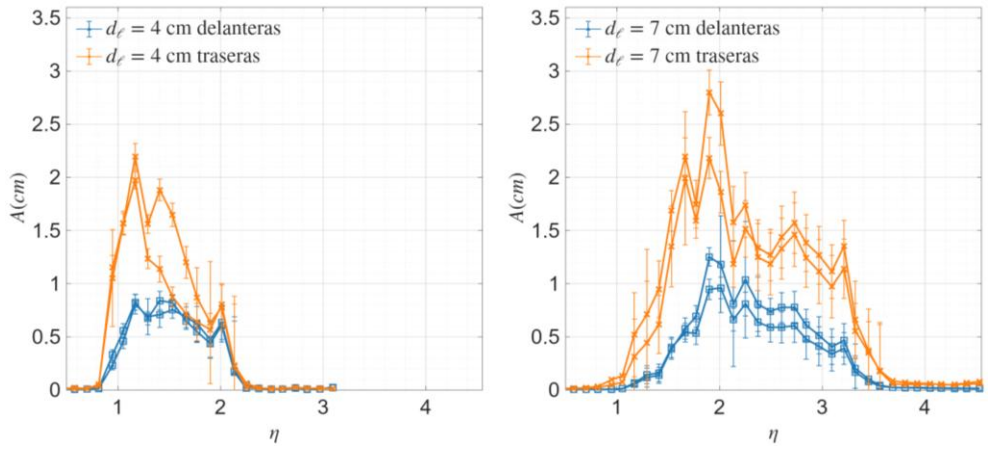


Figura 5. Evolución de la deflexión promedio $\boldsymbol{y_{prom}(L)/L}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ para las placas delanteras y traseras. La curva negra representa la solución numérica de la ecuación de [6] para una sola placa. La curva verde representa la solución numérica de la ecuación de [6] con peso. Las líneas continuas naranja y azul representa la deflexión promedio de las placas traseras. Finalmente, la línea vertical corresponde al valor de $\boldsymbol{\eta = \eta_s}$ en el cual las placas delanteras están próximas a tocar a las traseras para $\boldsymbol{d_\ell = 4}$ cm.

Amplitud de oscilación

En la figura 6 se observa la amplitud de oscilación $\boldsymbol{A}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ para las placas delanteras (1 y 2) representadas por el color azul y las traseras (3 y 4) representadas por el color naranja. Para la distancia $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm (figura 6(a)), las placas delanteras y traseras comienzan a oscilar al mismo valor crítico $\boldsymbol{\eta_c} \approx 0.81$. En cambio, para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm (figura 6(b)), las placas traseras empiezan a oscilar con un $\boldsymbol{\eta_c} \approx 1.17$ menor que el de las delanteras ($\boldsymbol{\eta_c} \approx 1.29$). En ambos casos ($\boldsymbol{d_\ell} = 4$ y 7 cm), las placas traseras alcanzan una amplitud máxima $\boldsymbol{A_{max}}$ mayor que las delanteras. Además, para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm, las placas llegan a entrar en contacto físico y dejan de oscilar para $\boldsymbol{\eta_s} \approx 2.25$; mientras que para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm no hay contacto físico para el rango explorado de $\boldsymbol{\eta}$. Sin embargo, observamos que, en este caso también, las oscilaciones cesan a partir de $\boldsymbol{\eta} = 3.68$, las placas permaneciendo flexionadas de manera estática arriba de este valor.

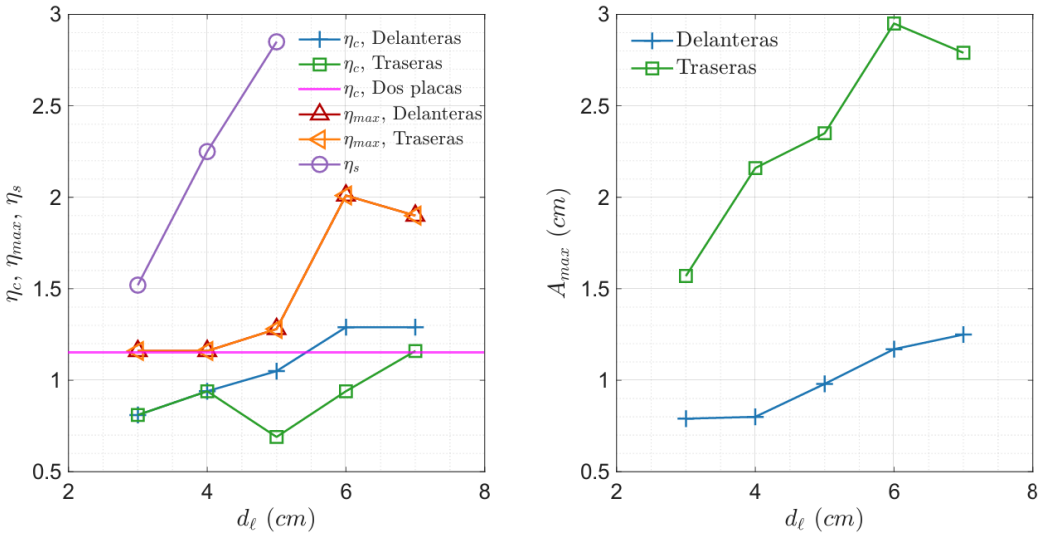


(a) (b)

Figura 6. Evolución de la amplitud $\boldsymbol{A}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ para cuatro placas dispuestas dos detrás de otras, para: a) $\boldsymbol{d_\ell}$ = 4 cm, b) $\boldsymbol{d_\ell}$ = 7 cm. Las curvas azules corresponden a las placas delanteras mientras que los puntos naranjos están asociados a las placas traseras. Las barras de error representan la incertidumbre experimental.

En la figura 7(a) se muestra la evolución de $\boldsymbol{\eta_c}$, que representa el número de Cauchy a partir del cual las placas comienzan a oscilar para todas las distancias $\boldsymbol{d_\ell}$. La curva azul representa $\boldsymbol{\eta_c}$ para las placas delanteras (1 y 2), mientras que la curva verde representa $\boldsymbol{\eta_c}$ para las placas traseras (3 y 4). Se observa que para distancias $\boldsymbol{d_\ell} = 3$ y 4 cm, ambos pares de placas empiezan a oscilar al mismo valor de $\boldsymbol{\eta_c}$. En cambio, para $\boldsymbol{d_\ell} = 5$, 6 y 7 cm, las placas traseras tienen un $\boldsymbol{\eta_c}$ menor que las delanteras, es decir que las placas traseras comienzan a oscilar antes que las delanteras. En esta misma gráfica, una línea horizontal magenta indica el valor de $\boldsymbol{\eta_c}$ en una configuración de referencia de dos placas una al lado de la otra. Un hallazgo sorprendente es que las cuatro placas pueden oscilar a partir de una velocidad por debajo de ese umbral cuando $\boldsymbol{d_\ell < 6}$ cm. Por otro lado, en la figura 7(a), también se reportan los valores de $\boldsymbol{\eta_{max}}$, el número de Cauchy para el cual se alcanza la amplitud máxima, representados por una curva roja para las placas delanteras y una curva naranja para las traseras. Cabe resaltar que, para todas las distancias $\boldsymbol{d_\ell}$, ambos pares de placas alcanzan su amplitud máxima en el mismo valor de $\boldsymbol{\eta_{max}}$, aunque los valores de esta amplitud máxima $\boldsymbol{A_{max}}$ no es la misma. La figura 7(b) reporta la evolución de esta amplitud máxima $\boldsymbol{A_{max}}$ en función de la distancia longitudinal $\boldsymbol{d_\ell}$: es claro que el par de placas traseras alcanza amplitudes mayores para todas las distancias de separación. Por otra parte, $\boldsymbol{A_{max}}$ alcanza su mayor valor cuando $\boldsymbol{d_\ell = 6}$ cm: esta distancia correspondería a la distancia longitudinal "óptima" si el propósito fuera maximizar las oscilaciones del sistema.

Finalmente, en la figura 7(a), se indica mediante una línea morada y símbolos circulares el valor $\boldsymbol{\eta_s}$ en el cual cesan las oscilaciones por contacto físico. Como se explicó anteriormente, para $\boldsymbol{d_\ell} \geq$ 6 cm, las placas no entran en contacto, pero cesan de oscilar. Este fenómeno será estudiado en un futuro.

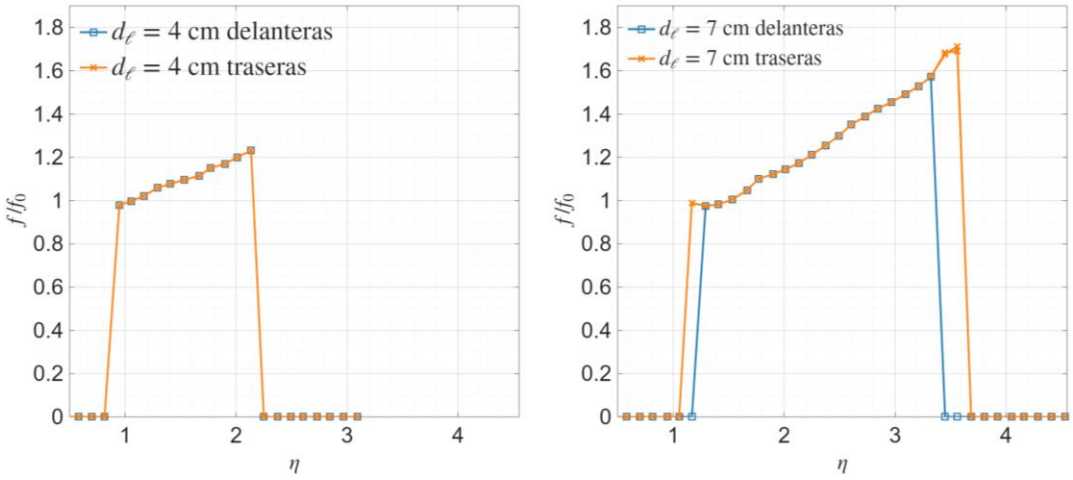


(a) (b)

Figura 7. (a) Evolución de $\boldsymbol{\eta_c}$, $\boldsymbol{\eta_{max}}$ y $\boldsymbol{\eta_s}$ en función de la distancia $\boldsymbol{d_\ell}$. (b) Evolución de $\boldsymbol{A_{max}}$ para las placas delanteras y traseras en función de la distancia $\boldsymbol{d_\ell}$.

Frecuencia de oscilación

La figura 8 muestra la evolución de la frecuencia de oscilación $\boldsymbol{f}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$. Los cuadrados de color azul corresponden a las placas delanteras, mientras que los asteriscos de color naranja a las placas traseras. Para la distancia $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm (figura 8(a)) las placas delanteras y traseras comienzan a oscilar al mismo valor crítico $\boldsymbol{\eta_c}$. mientras que, para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm, las placas traseras son las primeras en oscilar (menor $\boldsymbol{\eta_c}$), como se había mencionado anteriormente. En ambos casos, las oscilaciones inician con una frecuencia igual (a 2 % cerca) a la frecuencia propia de las placas.

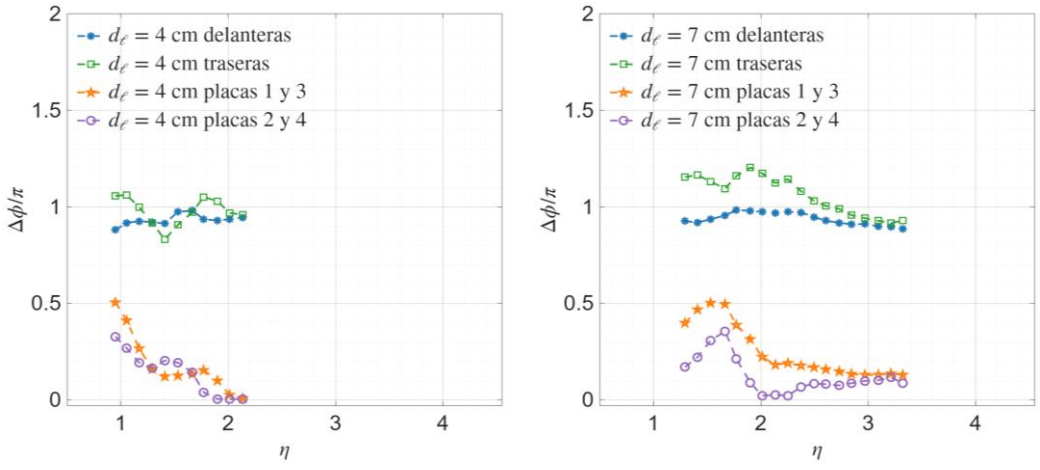


(a) (b)

Figura 8. Evolución de la frecuencia de oscilación $\boldsymbol{f}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ para cuatro placas dispuestas dos detrás de otras, para: a) $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm, b) $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm. Las barras de error que representan la incertidumbre experimental son del mismo tamaño que los marcadores, por tal motivo no se grafican.

Diferencia de fase

Finalmente, la evolución de la diferencia de fase $\boldsymbol{\Delta\phi}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ se reporta en la figura 9. Las marcas de color azul y verde corresponden a las placas ubicadas una al lado de la otra, mientras que las marcas naranja y morado corresponden a las placas ubicadas una detrás de la otra. Tanto para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm (figura 9(a)) como para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm (figura 9(b)), las placas situadas una al lado de la otra (tanto delanteras como traseras) oscilan en oposición de fase ($\boldsymbol{\Delta\phi} \simeq \boldsymbol{\pi}$). Para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm, las placas ubicadas una detrás de la otra inician con un desfase de $\boldsymbol{\pi/2}$, mientras que para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm, el desfase inicial entre placas una detrás de la otra se encuentra entre $\boldsymbol{\pi/4}$ y $\boldsymbol{\pi/2}$.



(a) (b)

Figura 9. Evolución del desfase $\boldsymbol{\Delta\phi}$ en función del número de Cauchy $\boldsymbol{\eta}$ para cuatro placas dispuestas dos detrás de otras, para; a) para $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm, b) $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm. Las barras de error que representan la incertidumbre experimental son del mismo tamaño que los marcadores, por tal motivo no se grafican.

Este comportamiento no es común en oscilador acoplados, ya que generalmente, la fase pasa de $\boldsymbol{\pi/2}$ en la resonancia a $\boldsymbol{\pi}$ cuando $\boldsymbol{f > f_0}$. No es el caso de nuestro sistema.

CONCLUSIONES

En este trabajo experimental se estudió la interacción entre cuatro placas flexibles, dos detrás de otras dos, en un flujo de aire. Para la distancia longitudinal $\boldsymbol{d_\ell} = 4$ cm, las placas delanteras y traseras comienzan a oscilar con un mismo valor $\boldsymbol{\eta_c}$. En cambio, para $\boldsymbol{d_\ell} = 7$ cm las placas traseras empiezan a oscilar a partir de un valor crítico $\boldsymbol{\eta_c}$ menor que el de las delanteras. Este fenómeno podría ser interesante para recuperar energía piezoeléctrica como en [2]. En ambas distancias, las placas traseras presentan una mayor amplitud de oscilación que las delanteras y una menor deflexión promedio debido al apantallamiento que provoca las delanteras sobre las traseras. El origen de estas oscilaciones será estudiado en un trabajo posterior, así como la construcción de un modelo de osciladores acoplados para reproducir cualitativamente las características principales de este sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Zhang, X. & Nepf, H. (2020), 'Flow-induced reconfiguration of aquatic plants, including the impact of leaf sheltering', Limnology and Oceanography 65(11), 2697–2712.
2. Hobeck, J. & Inman, D. (1997), Energy harvesting from dual cantilever flutter, in 'Proceedings of the ISVCS10, 10th International Symposium on Vibrations of Continuous Systems, Estes Park, CO, USA', pp. 11–15.
3. Vogel, S. & Berg, H. C. (1998), 'Cats' paws and catapults: Mechanical worlds of nature and people'.
4. Vogel, S. (1994), 'Life in moving fluids (2nd edn)'.
5. Alben, S., Shelley, M. & Zhang, J. (2002), 'Drag reduction through self-similar bending of a flexible body', Nature 420(6915), 479–481.
6. Gosselin, F., De Langre, E. & Machado-Almeida, B. (2010), 'Drag reduction of flexible plates by reconfiguration', Journal of Fluid Mechanics 650, 319–341.
7. Blevins, R. (2005), 'Forces on and stability of a cylinder in a wake', Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 127(1), 39–45.
8. Dalton, C. & Szabo, J. (1977), 'Drag on a group of cylinders', Journal of Pressure Vessel Technology 99(1), 152–157.
9. Luhar, M. & Nepf, H. M. (2011), 'Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation', Limnology and Oceanography 56(6), 2003–2017.

FORMACIÓN DE CENTROS N–V–N EN NANODIAMANTES FLUORESCENTES MEDIANTE OZONIZACIÓN Y ULTRASONIDO: OPTIMIZACIÓN DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL Y ESTABILIDAD COLOIDAL

Laura Verenis López De Arriba[1], Oxana Vasilievna Kharissova[1], Idalia Gómez De La Fuente[2] y José Apolinar Loyola Rodríguez[1]

[1]Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, [2]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León.
verenis.lopezd@uanl.edu.mx, oxana.kharissova@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los nanodiamantes (NDs) son nanopartículas de carbono con un núcleo predominantemente sp3 y una capa superficial sp2. Su superficie está enriquecida con diversos grupos funcionales (carboxilos, hidroxilos, aminas y amidas), lo que permite modificar sus propiedades físicas y químicas para aplicaciones específicas. En los nanodiamantes fluorescentes (FNDs), la incorporación de nitrógeno (N) en la red cristalina favorece la formación de centros de vacancia (N-V), dando lugar a una fluorescencia estable. El objetivo de este estudio fue favorecer la formación de estos centros N–V en NDs (4–6 nm) mediante tratamientos de ultrasonido, ozonización (O_3) y su aplicación conjunta como rutas de modificación superficial. Para ello, los NDs se dispersaron en agua a dos concentraciones (0.01 g y 0.001 g en 10 mL) y se funcionalizaron con los compuestos: (i) teraftal (sal sódica de octa-4,5-carboxiftalocianina de cobalto), (ii) ácido ascórbico, (iii) ácido cítrico, y (iv) urea. Posteriormente las dispersiones se sometieron a O_3 durante 0.75–1.5 h y/o a tratamiento ultrasónico (35 kHz) durante 5-20 h. Los nanosistemas resultantes se caracterizaron mediante espectroscopía: FTIR, Raman, UV–vis y fotoluminiscencia (PL); microscopía electrónica: SEM y TEM; y potencial zeta. Bajo excitación en 360–400 nm (UV-A), se observó fluorescencia verde-lima y azul, con máxima intensidad de emisión en la región visible. La combinación de O_3 y ultrasonido resultó más eficiente y permitió optimizar el proceso de modificación superficial, reduciendo el tiempo de trabajo. Asimismo, se obtuvo alta estabilidad coloidal, reflejada en potenciales zeta de 36.67 ± 0.96 mV y 37.87 ± 2.57 mV. Estos FNDs presentan aplicaciones potenciales en bioimagen, sensores ópticos y administración de fármacos.

Palabras clave: nanodiamantes fluorescentes, centros N–V–N, ozonización, ultrasonido, fotoluminiscencia, estabilidad coloidal, funcionalización superficial.

INTRODUCCIÓN

Los NDs son nanoestructuras de carbono que combinan la estabilidad química del diamante con una superficie altamente reactiva. Su núcleo sp^3 proporciona resistencia estructural, mientras que la capa superficial, parcialmente enriquecida con dominios sp^2 y grupos funcionales como carboxilos (–COOH), hidroxilos (O–H), aminas ($–NH_2$), amidas ($–CONH_2$) y carbonilos (C=O), determina su interacción con el medio acuoso y con moléculas orgánicas o inorgánicas [1, 2]. Esta dualidad núcleo-superficie convierte a los NDs en plataformas versátiles para aplicaciones biomédicas, optoelectrónicas y de sensado, especialmente cuando su superficie se modifica de manera controlada.

Las propiedades ópticas de los NDs se originan en la presencia de defectos puntuales en la red cristalina, los cuales actúan como centros emisores estables [3]. El más estudiado es el centro de vacancia de nitrógeno (N–V), que se forma cuando un átomo de N sustitucional se sitúa adyacente a una vacancia de carbono. Dependiendo de su estado de carga, estos centros producen distintos fenómenos de fotoluminiscencia: el estado neutro NV^0 emite en la región naranja del espectro (~575 nm), el estado cargado negativamente NV^- emite en el rojo–infrarrojo (~637 nm), y la configuración N–V–N (centro H3, con línea de fonón cero a ~503 nm en diamante masivo) induce emisión en la región verde [4]. En NDs de tamaño ultrapequeño (<10 nm), el confinamiento cuántico y la alta

relación superficie-volumen amplían y desplazan estas bandas, de modo que la emisión se manifiesta como una banda ancha en 500–520 nm cuando los NDs presentan defectos relacionados con N [5]. La creación controlada de centros N–V en NDs generalmente requiere irradiación iónica de alta energía, altas presiones o tratamientos térmicos agresivos, lo que incrementa el costo del proceso y limita su escalabilidad [6]. En respuesta a estas limitaciones, el presente trabajo propone una estrategia sostenible de obtención de FNDs empleando dos rutas de activación: 1) ultrasonido y 2) O_3 [7] combinado con ultrasonido; junto con agentes funcionalizantes orgánicos e inorgánicos, considerando ambos efectos sobre la química superficial, estabilidad coloidal y respuesta fotoluminiscente [8]. La hipótesis central es que la cavitación acústica genera "nano-recocidos" locales y radicales reactivos que movilizan vacancias en la red superficial, las cuales pueden ser capturadas por centros de N preexistentes para formar complejos N–V o N–V–N. La preoxidación con O_3 actúa de forma sinérgica al suprimir dominios residuales sp^2 y activar sitios de anclaje, reduciendo los canales no radiativos y aumentando la densidad efectiva de centros emisores.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y equipos

Los NDs primarios empleados en este estudio fueron sintetizados previamente por síntesis hidrotermal asistida por microondas. Los compuestos funcionalizantes utilizados fueron: teraftal (TF, sal sódica de octa-4,5-carboxiftalocianina de cobalto), procedente del Instituto Estatal de Investigación de Aplicaciones Químicas (NIOPIK, Rusia); ácido ascórbico (AA, $C_6H_8O_6$, pureza ≥ 99%, CAS 50–81–7, Sigma-Aldrich); ácido cítrico (AC, $C_6H_8O_7$); y urea (UR, NH_2CONH_2, CAS 57–13–6, Sigma-Aldrich). Para la generación de O_3 se empleó un generador GL-3189a (Guanglei Environmental Protection Technology). El tratamiento ultrasónico se llevó a cabo con un baño FS140 (Fisher Scientific, 42 kHz). La centrifugación se realizó a 3000 rpm durante 15 min, seguida de filtración con membranas de 200 nm (PTFE).

Síntesis y nomenclatura de muestras

Se prepararon once muestras experimentales con variaciones en la concentración de NDs (10 mg o 1 mg por 10 mL de AD), en el tipo de agente funcionalizante incorporado y en el tratamiento físico aplicado. La nomenclatura empleada es la siguiente: las muestras tratadas únicamente con ultrasonido se denominan U-M# (donde # indica el número de muestra), y las tratadas con la combinación O_3 + ultrasonido se denominan OU-M#. La letra L al final de la clave indica baja concentración de NDs (0.1 mg/mL). Para cada muestra se preparó un control correspondiente (MC-#) en ausencia de cualquier tratamiento físico, empleado como referencia para evaluar los cambios inducidos.

Tabla 1. Composición y condiciones de tratamiento de los nanosistemas preparados.

Muestras	NDs (mg)	AD (mL)	TF (mg)	AA (mg)	AC (mg)	UR (mg)	O_3 (min)	US (h)
U-M1	10	10	–	–	–	–	–	20
U-M2	10	10	1	–	–	–	–	20
U-M3	10	10	1	1	–	–	–	15
U-M4	10	10	1	–	–	1	–	20
U-M5L	1	10	–	1	–	–	–	15
OU-M1	10	10	–	–	–	–	90	5
OU-M2	10	10	1	–	–	–	90	5
OU-M3	10	10	1	1	–	–	45	5
OU-M4	10	10	1	–	–	1	45	5
OU-M3L	1	10	1	1	–	–	90	5
OU-M7L	1	10	1	–	1	–	90	5

Procedimiento de funcionalización y tratamientos.

Los NDs de 4–6 nm se pesaron con precisión y se dispersaron en agua destilada (AD) junto con los agentes funcionalizantes definidos en el diseño experimental. Una vez preparadas las dispersiones, se aplicaron los tratamientos físicos: (i) ultrasonido durante 15 o 20 h en ciclos de 3 h (temperatura máxima del baño: 46 °C); o (ii) exposición a O_3 durante 45 o 90 min, seguida de 5 h de ultrasonido. Al finalizar los tratamientos, todas las dispersiones se purificaron mediante centrifugación (3000 rpm, 15 min) y filtración con membranas de 200 nm.



Fig. 1. Metodología experimental propuesta para la obtención de FNDs.

Técnicas de caracterización

La morfología y estructura cristalina de los NDs primarios se evaluaron mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HR-TEM) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los grupos funcionales superficiales se identificaron por espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR). La integridad de la red cristalina del diamante se confirmó por espectroscopía Raman, verificando el pico característico en 1332 cm^{-1} correspondiente al modo de estiramiento C–C sp^3. La respuesta óptica de los nanosistemas se evaluó mediante espectroscopía UV-Vis y fotoluminiscencia (PL) bajo múltiples longitudes de onda de excitación (280–420 nm). La estabilidad coloidal se determinó mediante medición de potencial zeta (ζ) con un analizador Malvern Zetasizer Nano ZS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis por HR-TEM de los NDs primarios antes de cualquier tratamiento reveló nanopartículas con tamaños en el intervalo de 4 a 6 nm, con un promedio de 5.41±0.85 nm. Las imágenes de alta resolución mostraron un espaciamiento interplanar de 0.206 nm, correspondiente al plano cristalográfico (111) del diamante cúbico, lo que confirma la naturaleza nanocristalina del material. En varias nanopartículas se observaron bordes bien definidos, indicativos de dominios cristalinos preservados. La imagen SEM (escala de 500 nm, magnificación 100,000×) mostró una distribución relativamente uniforme de las nanopartículas sobre la superficie analizada, con evidencia de aglomeración parcial, comportamiento esperado en NDs sin tratamiento previo de desaglomeración.

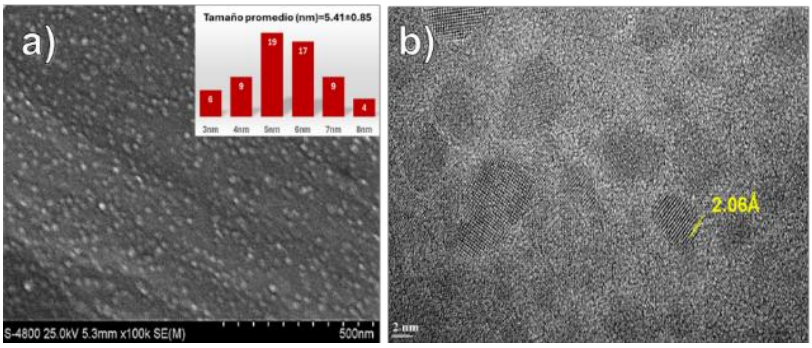


Fig. 2. Imágenes de **a)** SEM de NDs primarios (escala de 500 nm, 100,000×), mostrando su distribución superficial; **b)** HR-TEM (barra de escala de 2 nm) que evidencia el espaciamiento cristalino del plano (111) con una distancia interplanar de 0.206 nm, característica de la red del diamante cúbico.

El espectro Raman de los NDs primarios, obtenido con excitación a 325 nm, presentó el pico característico del diamante sp^3 en 1332 cm^{-1} (**Fig. 3b**). Este pico se observó como una banda ancha y ligeramente asimétrica, lo cual es consistente con el confinamiento de fonones ópticos en nanocristales de diámetro inferior a 10 nm: el confinamiento cuántico origina el ensanchamiento y desplazamiento asimétrico del pico hacia menores números de onda, así como la aparición de un hombro alrededor de ~1250 cm^{-1}. Adicionalmente, se detectaron la banda G del carbono sp^2 (~1560 cm^{-1}) y la banda D (~1360 cm^{-1}), reflejando la presencia de la capa grafítica superficial y de carbono desordenado, típica de la estructura núcleo-coraza de los NDs. La línea roja en el espectro evidencia la presencia de luminiscencia intrínseca. El espectro FT-IR de los NDs primarios en estado sólido (**Fig. 3a**) mostró una superficie rica en grupos funcionales oxigenados y nitrogenados: bandas anchas de O–H y N–H en la región 3700–3000 cm^{-1}; vibraciones de C–H alifáticos (CH_2, CH_3) entre 3000–2800 cm^{-1}; C=O (carbonilo) entre 1750–1680 cm^{-1}; C=C conjugado alrededor de 1650–1600 cm^{-1}; deformaciones de CH_2 en ~1419 cm^{-1}; C–N en ~1328 cm^{-1}; y vibraciones de C–O y C–O–C en la región 1200–1000 cm^{-1}. Esta riqueza funcional inicial, que incluye grupos tanto oxigenados como nitrogenados, constituyó una base favorable para la funcionalización posterior.

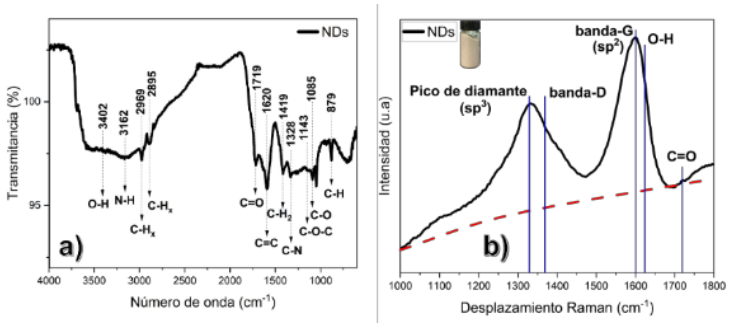


Fig. 3. NDs primarios antes de las etapas de tratamiento y funcionalización: **a)** espectro FT-IR; **b)** espectro Raman con un pico característico a 1332 cm^{-1} (λ = 325 nm).

Los espectros FT-IR de las muestras tratadas con ultrasonido y con O_3 + ultrasonido se compararon para identificar los cambios inducidos por cada tratamiento en la química superficial de los NDs (**Fig. 4**).

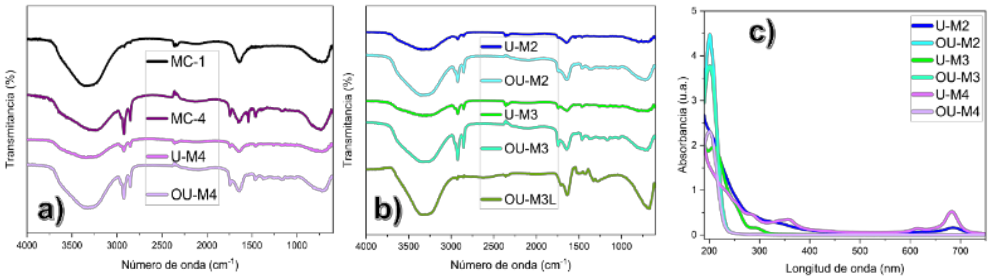


Fig. 4. Caracterización FT-IR y UV-Vis de las muestras de NDs. a-b) Espectros FT-IR de muestras funcionalizadas tratadas con ultrasonido (serie U-M) y con O3 + ultrasonido (serie OU-M). c) Espectro UV-Vis de las muestras.

En todas las muestras se mantuvieron las bandas de O–H (~3355 cm^{-1}), C=C (~1650 cm^{-1}) y C=O (~1740 cm^{-1}), lo que indica la preservación de los grupos oxigenados característicos de los NDs. La banda de C=O mostró un comportamiento variable dependiente tanto de la composición química de cada muestra como del tiempo de ozonización: en algunas muestras este grupo se intensificó o apareció tras el tratamiento, mientras que en otras disminuyó, evidenciando que el equilibrio entre oxidación superficial y funcionalización orgánica con los compuestos añadidos determina la estabilidad final del carbonilo. Las bandas de N–H detectadas en la región de 1540–1493 cm^{-1} estuvieron presentes en la mayoría de las muestras funcionalizadas, con excepción de aquellas sin compuestos nitrogenados. El enlace C–N (~1355 y 1162 cm^{-1}) se detectó preferentemente en muestras que contenían TF, y algunas mostraron también la vibración C–N–C (~1223 cm^{-1}), característica del sistema macrocíclico del TF. La banda de Co–N a 686–730 cm^{-1}, correspondiente al enlace entre el centro metálico del TF y los átomos de N del macrociclo, se identificó exclusivamente en muestras que contenían TF, sirviendo como marcador espectral de la adsorción de este compuesto sobre los NDs.

Los espectros UV-Vis de las muestras tratadas (**Fig. 4c**) presentaron transiciones electrónicas características de los grupos funcionales y compuestos incorporados. Las muestras que contenían TF mostraron transiciones π→π* intensas en el intervalo 200–250 nm, así como transiciones n→π* y una banda característica en 650–700 nm correspondiente a π→π* extendida de la estructura aromática del TF. Esta última banda desapareció en las muestras que combinaban AA + TF, lo que indica que el AA interfiere en la conjugación electrónica del TF mediante efectos redox o competencia superficial. Las muestras sin TF presentaron absorciones más débiles, centradas en 200–250 nm, asociadas con las transiciones π→π* de los grupos C=C de los NDs y de las moléculas funcionalizantes. Las muestras a baja concentración de NDs (serie L) mostraron espectros de menor intensidad, pero con el mismo perfil cualitativo, confirmando la influencia dominante de los agentes funcionalizantes sobre la respuesta óptica en el ultravioleta.

Cada compuesto funcionalizante desempeñó un papel específico en la modificación superficial de los NDs. El ácido ascórbico (AA) actuó como agente reductor y antioxidante, favoreciendo la generación de grupos O–H y C=O mediante la donación de electrones ($C_6H_8O_6 \rightarrow C_6H_6O_6 + 2H^+ + 2e^-$; $E^o = 0.39$ V). Sus grupos O–H establecen puentes de hidrógeno con la superficie de los NDs e interactúan con los grupos –COOH y C=O superficiales, contribuyendo a una funcionalización más estable. En medio acuoso, el ascorbato puede también generar H_2O_2 como subproducto, actuando como oxidante local y activando sitios de anclaje para la incorporación de N. El teraftal (TF), que es un compuesto macrocíclico con un sistema aromático altamente conjugado y un centro de Co^{2+}, aporta átomos de N al sistema a través de los múltiples átomos de N presentes en su estructura de ftalocianina. Al ionizarse en medio acuoso, los grupos carboxilato (COO^-) establecen interacciones electrostáticas con grupos $–NH_2$ y O–H superficiales, mientras que los anillos aromáticos se anclan sobre las regiones grafíticas de los NDs mediante interacciones π–π*. Esta combinación de anclaje electrostático y aromático favorece una adsorción estable y un aporte continuo de N a la interfaz partícula-medio. La mezcla AA + TF genera una sinergia redox en la que el ascorbato reduce el

centro de Co^{2+} del TF, generando reacciones acopladas y H_2O_2 in situ como oxidante local que activa la superficie.

La urea (UR), con sus dos grupos amino ($–NH_2$), establece enlaces de hidrógeno con los grupos –COOH y C=O superficiales y puede reaccionar con carboxilos activados para formar enlaces tipo amida ($–CONH_2$), funcionando como fuente de nitrógeno. El ácido cítrico (AC, $C_6H_8O_7$), incorporado en la muestra OU-M7L, aporta tres grupos carboxilos y un grupo O–H, lo que incrementa la densidad de grupos oxigenados en la superficie y refuerza la estabilidad coloidal mediante repulsión electrostática.

No obstante, la presencia de estos agentes funcionalizantes por sí sola no garantiza una modificación efectiva de los NDs ni la activación de centros emisores. Su papel químico depende de que la superficie de los NDs sea previamente activada o reordenada mediante un estímulo energético capaz de desaglomerar las partículas, exponer sitios reactivos y favorecer la interacción entre los grupos funcionales incorporados y la red superficial del carbono. En este sentido, la funcionalización química y los tratamientos físicos no actuaron como procesos independientes, sino como etapas complementarias: los agentes funcionalizantes aportaron especies oxigenadas y nitrogenadas, mientras que el ultrasonido y el O_3 proporcionaron las condiciones necesarias para que dichas especies interactuaran de manera más eficiente con la superficie de los NDs. El ultrasonido actúa mediante cavitación acústica creando ciclos de expansión y compresión en el líquido. Cuando las burbujas de cavitación colapsan se liberan cantidades significativas de energía en regiones muy pequeñas y se generan puntos calientes locales y ondas de choque que impactan la superficie de los NDs a ~10^2 m/s. Este fenómeno induce sonólisis del medio con formación de radicales O–H, los cuales oxidan la superficie de los NDs incorporando grupos –COOH y C=O. A escala nanométrica, estos eventos corresponden a "nano-recocidos" transitorios y repetitivos que pueden movilizar vacancias superficiales y facilitar su captura por centros de N preexistentes, favoreciendo las rutas V + P1 → N–V y V + (N–H)A → N–V–N. El ozono (O_3), por su alto potencial redox, actúa de forma más selectiva y controlada sobre los dominios sp^2 y las regiones grafíticas de la capa superficial de los NDs, eliminando carbono amorfo, introduciendo grupos O–H, C=O y –COOH, e incrementando la hidrofilia y reactividad superficial. Al suprimir los canales no radiativos asociados con los dominios sp^2, la preoxidación con O_3 prepara una superficie más activa para la posterior activación mecánica con ultrasonido, lo que explica la mayor eficiencia del tratamiento combinado.

Las propiedades fotoluminiscentes de los FNDs obtenidos son el resultado central de este trabajo. Las muestras control (MC-#) no mostraron luminiscencia (**Fig. 5a**) bajo irradiación UV (365 nm), confirmando la ausencia de centros emisores activos antes de los tratamientos. Las muestras tratadas únicamente con ultrasonido y sin compuestos nitrogenados (U-M1) tampoco exhibieron luminiscencia significativa (**Fig. 5c**), lo que indica que el ultrasonido por sí solo es insuficiente para generar centros N–V en ausencia de una fuente de N.



Fig. 5. FNDs obtenidos. **a)** Muestras control de NDs funcionalizados con compuestos activos sin recibir tratamientos; **b-d)** presencia de centros emisores de fluorescencia en las muestras con tonalidades verde-lima y azul.

Los estudios de fotoluminiscencia mostraron que la máxima emisión de intensidad se alcanzó bajo excitación en la región UV-A (340–360 nm), con bandas anchas centradas en ~500–520 nm (**Fig. 6**). Este comportamiento espectral, junto con la ausencia de señales a 575 nm o 637–638 nm características de los estados NV^0 y NV^-, orienta la interpretación hacia el centro N–V–N (H3) como el contribuyente principal a la emisión verde observada. La línea de fonón cero del H3 se ubica en

~503 nm en diamante masivo, y su desplazamiento y ensanchamiento en los NDs de este estudio es consistente con el confinamiento cuántico, la alta relación superficie-volumen y la superposición con estados emisores introducidos por los grupos C=O, C–O y O–H superficiales en el intervalo 450–550 nm.

Las muestras tratadas con O_3 + ultrasonido presentaron una respuesta fotoluminiscente más intensa que sus equivalentes tratados solo con ultrasonido. Esta mejora se atribuye al efecto sinérgico del O_3: al eliminar dominios sp^2 y activar grupos oxigenados en la superficie, el O_3 reduce los canales de desactivación no radiativa y aumenta la densidad efectiva de sitios emisores relacionados con N. El ultrasonido posterior completa la funcionalización mediante la desaglomeración de las partículas y la generación de radicales que movilizan vacancias superficiales. La combinación secuencial de ambos tratamientos logró reducir el tiempo total de procesamiento de 15–20 h (ultrasonido aislado) a menos de 7 h (O_3 + ultrasonido), lo que representa una optimización de hasta el 71.25% del tiempo experimental, manteniendo o superando la calidad de la respuesta fotoluminiscente (**Tabla 2.**).

Tabla 2. Comparación general de los tiempos de tratamiento entre la ruta de ultrasonido y la ruta combinada O_3 + ultrasonido. Los porcentajes se expresan como reducción estimada del tiempo total respecto al ultrasonido aislado.

Comparación	Ruta US (h)	Ruta O_3 + US (h)	Reducción estimada
Muestras con TF	20	90 min + 5 h	≈ 67.5 %
Muestras TF + AA	15	45–90 min + 5 h	≈ 56.7–61.7 %
Muestras TF + UR	20	45 min + 5 h	≈ 71.3 %

La potencial zeta (ζ) de los nanosistemas sintetizados reflejó claramente el impacto de cada tratamiento y composición sobre la estabilidad coloidal de los FNDs (**Tabla 3.**). Los valores más negativos, indicativos de mayor estabilidad, se obtuvieron en las muestras que contenían TF, particularmente U-M4 (NDs + TF + UR: –36.67 ± 0.96 mV) y U-M2 (NDs + TF: –37.87 ± 2.57 mV). Estos valores superan el umbral de –30 mV generalmente aceptado como indicativo de alta estabilidad coloidal. La estabilización electrostática en estas muestras se debe a la formación de una capa densa de grupos carboxilato (COO^-) en la superficie de los NDs, aportados por los grupos –COOH del TF anclados mediante interacciones π–π* sobre las regiones sp^2 de la capa superficial. Esta capa cargada incrementa la barrera electrostática entre partículas, inhibiendo la agregación y promoviendo una dispersión homogénea en medio acuoso.

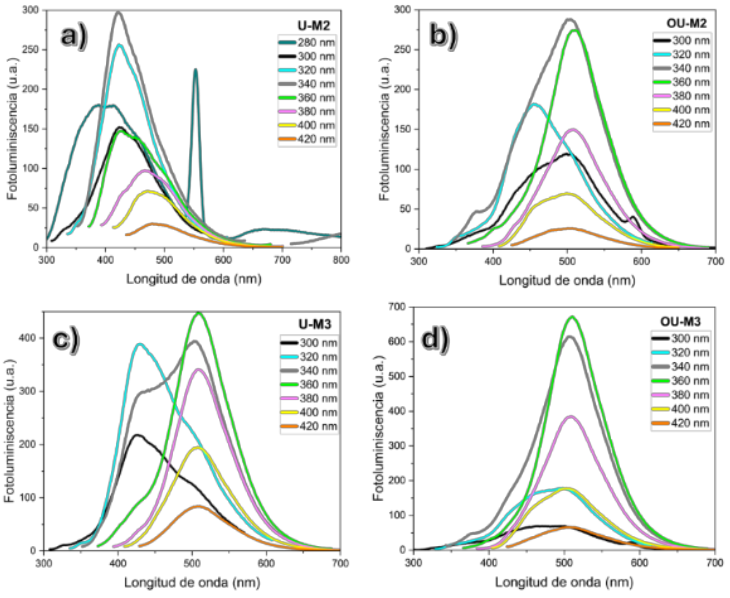


Fig. 6. Espectros de fotoluminiscencia de FNDs bajo diferentes longitudes de onda de excitación (280–420 nm). **a-b)** U-M2 y OU-M2 (NDs + AD + TF).; **c-d**) U-M3 y OU-M3 (NDs + AD + TF + AA).

Las muestras que no contenían TF presentaron valores de ζ menos negativos, reflejando una menor densidad de grupos ionizados en la superficie. La incorporación de UR o AA sola mejoró moderadamente la estabilidad (entre –15 y –25 mV) respecto a las muestras sin funcionalizante. La mayor estabilidad coloidal también favorece las propiedades ópticas: la dispersión adecuada de los NDs en el medio reduce los contactos interparticulares y los dominios sp^2 de percolación que facilitan la transferencia de energía hacia estados trampa, disminuyendo así la velocidad de desactivación no radiativa (k_{nr}) y aumentando el rendimiento cuántico de la emisión.

Tabla 3. Estabilidad coloidal: potencial ζ.

Muestras	ζ1 (mV)	ζ2 (mV)	ζ3 (mV)	Media ζ (mV)	DE (mV)
MC-1	-4.27	-5.21	-5.47	-4.98	0.63
U-M1	-7.66	-8.23	-8.50	-8.13	0.43
OU-M3	-18.00	-16.70	-13.20	-15.97	2.48
U-M3	-21.60	-23.00	-28.30	-24.30	3.53
U-M2	-34.90	-39.30	-39.40	-37.87	2.57
U-M4	-35.80	-36.50	-37.70	-36.67	0.96

CONCLUSIONES

El presente trabajo demuestra que la funcionalización superficial de NDs primarios de 4–6 nm mediante compuestos activos (TF, AA, AC, UR), combinada con tratamientos de ultrasonido y ozonización, constituye una estrategia eficiente para inducir y modular propiedades fotoluminiscentes en medio acuoso. La respuesta óptica obtenida evidenció la formación de FNDs con dos tonalidades principales de emisión bajo excitación UV: fluorescencia azul y fluorescencia verde-lima intensa. La emisión observada, con bandas anchas centradas en ~500–520 nm bajo excitación en 340–360 nm (UV-A) y ausencia de señales a 575 nm o 637–638 nm, es consistente con la presencia de centros N–V–N (H3) como principales responsables de la fluorescencia verde en estos nanosistemas. El análisis FT-IR confirmó la formación de nuevos grupos N–H, C–N, $CONH_2$ y Co–N, resultantes de la interacción con estos agentes funcionalizantes. El tamaño promedio de los NDs fue de ~4.8 nm después de 0.75 h de aplicación de O_3 y 5 h de ultrasonido, mientras que tras 15 h de ultrasonido se observaron tamaños alrededor de ~4.4 nm. La activación de la fotoluminiscencia inducida por tratamiento ultrasónico fue limitada, lo que indica que el ultrasonido por sí solo no es suficiente para inducir centros emisores con alta eficiencia. En cambio, la combinación de O_3 y ultrasonido demostró una efectividad superior en la activación de la respuesta fotoluminiscente de los NDs. Este enfoque combinado de modificación superficial también permitió una optimización significativa en el tiempo de procesamiento, de 20 h a menos de 7 h (una reducción de hasta el 71%). En este entorno, las vacancias generadas o movilizadas cerca de la superficie pueden ser capturadas por centros de N preexistentes, posibilitando las dos rutas clásicas: V + P1 → N–V y V + (N–N) A → N–V–N (H3). Los FNDs obtenidos presentaron alta estabilidad coloidal, con potenciales zeta de hasta –36.67 ± 0.96 mV y –37.87 ± 2.57 mV en las muestras más estables, valores que garantizan una dispersión adecuada en medio acuoso y reducen la desactivación no radiativa por contactos interparticulares.El mantenimiento del tamaño nanométrico (< 10 nm) confirmado por TEM, junto con la baja toxicidad intrínseca documentada en la literatura para NDs de esta naturaleza, posiciona a estos FNDs como candidatos prometedores para aplicaciones en bioimagen, biosensores ópticos y plataformas teranósticas.

AGRADECIMI ENTOS

Los autores se agradecen a UANL por el soporte financiera del programa PROACTI.

BIBLIOGRAFÍA

1. Krueger, A. New Carbon Materials: Biological Applications of Functionalized Nanodiamond Materials. Chemistry – A European Journal 14, 2008, pp.1382–1390.
2. Mochalin, V. N., Shenderova, O., Ho, D. & Gogotsi, Y. The properties and applications of nanodiamonds. Nat. Nanotechnol. 7, 2012, pp.11–23.
3. Chang, H., Hsiao, W. W. & Su, M. Fluorescent Nanodiamonds. Wiley, 2018. doi:10.1002/9781119477099.
4. Zaitsev, A. M. Optical Properties of Diamond. Springer Berlin Heidelberg, 2001. doi:10.1007/978-3-662-04548-0.
5. Jung, H.-S. & Neuman, K. C. Surface Modification of Fluorescent Nanodiamonds for Biological Applications. Nanomaterials 11,2021, p153.
6. Reina, G., Zhao, L., Bianco, A. & Komatsu, N. Chemical Functionalization of Nanodiamonds: Opportunities and Challenges Ahead. Angew. Chem. Int. Ed. 58, 2019, pp.17918–17929.
7. Ackermann, J. & Krueger, A. Efficient surface functionalization of detonation nanodiamond using ozone under ambient conditions. Nanoscale 11,2019, pp.8012–8019.
8. De Arriba, L. V. L., Kharissova, O. V., Mena, D. N. & Kharisov, B. I. Synthesis and characterization of fluorescent nanodiamonds (FNDs) by functionalization with Cissus Incisa in theraphthal-containing media. MRS Adv. 10,2025, pp. 964–971.

DESARROLLO DE UN SIMULADOR INTERACTIVO EN PYTHON PARA LA ENSEÑANZA DE LOS CONCEPTOS EN REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ

Ricardo Romero Martinez, Patricia Padilla Sosa, Héctor Hugo Cerecedo Núñez.

Facultad de Física, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México.
ric12024@gmail.com, ppadilla@uv.mx, hcerecedo@uv.mx

RESUMEN

En óptica, la reflexión de la luz se puede considerar como rayos que inciden sobre una superficie y se reflejan hacia el mismo medio del que provinieron. Por otra parte, la refracción de la luz es el cambio de dirección y velocidad que experimentan los rayos al pasar de un medio a otro. La reflexión y refracción de la luz son fundamentales para la comprensión de otros tipos de fenómenos, como la formación de imágenes, interferencia, difracción, etc. En esta propuesta se muestra un simulador para la visualización de los fenómenos de reflexión y refracción de la luz al interactuar con dos superficies planas-paralelas de diferentes medios. El simulador busca facilitar la comprensión y la visualización de estos fenómenos (reflexión y refracción de la luz) en tres dimensiones, considerando dos tipos distintos de medios. La creación de simulador apoyo aprendizaje bidireccional, es decir, un aprendizaje del quien lo construye y una enseñanza a quien lo utiliza. Al programar un simulador se comprende mejor los conceptos teóricos para después aplicar ese conocimiento en la programación. En la reflexión y refracción de la luz, no solo basta con conocer la ley de Snell de forma teórica; para programarla, es necesario entender la geometría vectorial, el manejo de ángulos en lenguajes de programación y la creación de la lógica del sistema. Este proceso de creación fomenta un autoaprendizaje, los errores que hubo en el proceso hicieron una comprensión más clara en estos fenómenos al solucionarlos. De igual manera se presentaron retos que un texto o libro no muestra, como la Ilustración precisa de los rayos o la interacción en tiempo real. Por otro lado, desde una perspectiva del aprendiz o de alguien que jamás ha escuchado este tema, es decir, siendo primerizo en escuchar este tipo de fenómenos, el simulador sería una herramienta que le facilitaría su comprensión. El simulador puede experimentar con variables que en la vida real son difíciles de conseguir o manipular (especificando a los índices de refracción). Además, como el simulador es interactivo provoca la curiosidad al usuario, lo que facilitara una retención del conocimiento mucho más duradera y significativa. Otra ruta por la cual se creó este simulador es publicarlo en un servidor de acceso libre es una declaración de principios sobre el Open Source y a la educación abierta. Manteniendo el simulador en un servidor gratuito garantizará que no existan barreras económicas, ni el autor, ni el usuario deberá pagar por el conocimiento. Una herramienta que estará disponible las 24 horas del día desde cualquier dispositivo con internet, así cualquier tipo de dispositivo se puede utilizarlo sin problemas. Y al estar en la RED (web), el simulador puede ser utilizado simultáneamente por un alumno o por un profesor en un aula frente a un grupo de personas, extendiendo el impacto de la herramienta mucha más allá del entorno donde fue creada.

INTRODUCCIÓN

Dia a día se apretura cada vez más el acceso al conocimiento, al igual que el desarrollo u el uso de sofware no comercial, no es la excepción, python es un lenguaje de programación libre y accesible. En trabajo presenta un simulador que modela los fenómenos reflexión y refracción de la luz bajo un modelo geométrico de rayos. Es importante entender estos fenómenos ya que son fundamentales para el comprensión de otros tipos de fenómenos ópticos. El usuario podrá experimentar con la interactividad de la animaciones, resultado del simulador, de esta manera facilitar la interpretación y la visualización de la reflexión y refracción de la luz. Así, esta propuesta se distingue de otras ya que ayudara a las personas que no cuenten con conocimiento de estos fenómenos de la luz. Y trata de fomentar el programar simulaciones de cualquier tipo fenómeno. Se espera establecer un aprendizaje bidireccional, es decir, un aprendizaje del quien lo construye y una enseñanza a quien

lo utiliza, por otra parte, también se propone publicarlo en un servidor de acceso libre, así se garantizará que no existen barreras económicas.

TEORÍA

La reflexión de la luz sucede cuando un rayo incidente interactúa con una superficie, haciendo que se refleje hacia su medio de origen, estableciendo que su ángulo incidente y de reflexión sea el mismo, y cumpliendo con la ley de la Reflexión.

$$\boldsymbol{\theta_i = \theta_r} \quad (1)$$

Posteriormente, la refracción de la luz se describe el cambio de dirección que experimenta un rayo de luz al propagarse entre medios con diferentes índices de refracción, siendo el índice de refracción incidente ($\mathbf{n_1}$) y índice de refracción de propagación ($\mathbf{n_2}$), este es el corazón de la teoría del simulador y es basado en la ley de snell.

$$\boldsymbol{n_1 sen(\theta_1) = n_2\, sen(\theta_2)} \quad (2)$$

Estas expresiones se aplican en el momento que el rayo índice en el medio de propagación y también cuando pasa del medio de propagación al medio de origen. El entendimiento de la trigonometría permite descomponer los ángulos en componentes rectangulares, mientras que el cálculo vectorial nos facilita determinar las trayectorias de los rayos, ya que se trataron como vectores. Por ultimo, es importante tener presente una base desarrollada en programación estructurada, ya que vamos aplicar conceptos de este tipo de programación; como las funciones, tipos de variables, bucles, condicionales, operadores lógicos, etc.

PARTE EXPERIMENTAL

El simulador que proponemos se divide en dos partes, la primera es el ”script” creado en el lenguaje de programación Python y la segunda es la interfaz gráfica hecho en Laravel + Vue que son dos frameworks muy potentes en el área del desarrollo de software. Ambos frameworks se utilizan para crear páginas web, pero en Laravel se realiza tanto como Front-End y Back-End, Vue se especializa únicamente en el desarrollo de Front-End (Ver figura 1). El script es el núcleo de la simulación, en esta parte se crearon todos los cálculos matemáticos necesarios para modelar la reflexión y refracción de la luz, es decir, se programó con ayuda de las librerías NumPy y Matplotlib la lógica que da vida a la animación resultante. NumPy se utilizó para realizar las operaciones matemáticas vectoriales necesarias, como el cálculo de los ángulos de incidencia, reflexión y refracción mediante la aplicación de la Ley de Snell, mientras que Matplotlib se encargó de la visualización y representación gráfica de los rayos de luz. La interfaz es la parte que interactúa con el usuario, esta internamente dividida en dos partes, una que está constituida en Laravel que se utiliza PHP como lenguaje de programación y la otra por Vue que utiliza JavaScript. En Vue se creó el Fron-End, es decir, la plantilla que ve a primera vista el usuario, toda la estructura de los componentes, como los campos de texto, descripciones, leyendas y botones de acción, esto es del diseño web, también aquí se crearon las validaciones necesarias para que no hubiera errores por datos incorrectos ingresados por el usuario. En Laravel se creó la parte del Back-End, en otras palabras, lo que no interactuó directamente con el usuario, como la conexión de la interfaz y el script, es la raíz principal de las dos partes del proyecto y en un futuro ayudara a que la aplicación web pueda ser escalable. EL usuario indica los parámetros mediante la interfaz (Vue), al completar el formulario y dar clic al botón, automáticamente se validan (para evitar bugs) y envían al Back-End (Laravel), se conecta con el script y se pasan los datos, el script trabaja con los parámetros y crea la animación, para después codificarla y enviarla a la interfaz para que finalmente el usuario la visualice e interactúe. En la figura 1 se muestra una diagrama completo del funcionamiento del simulador.

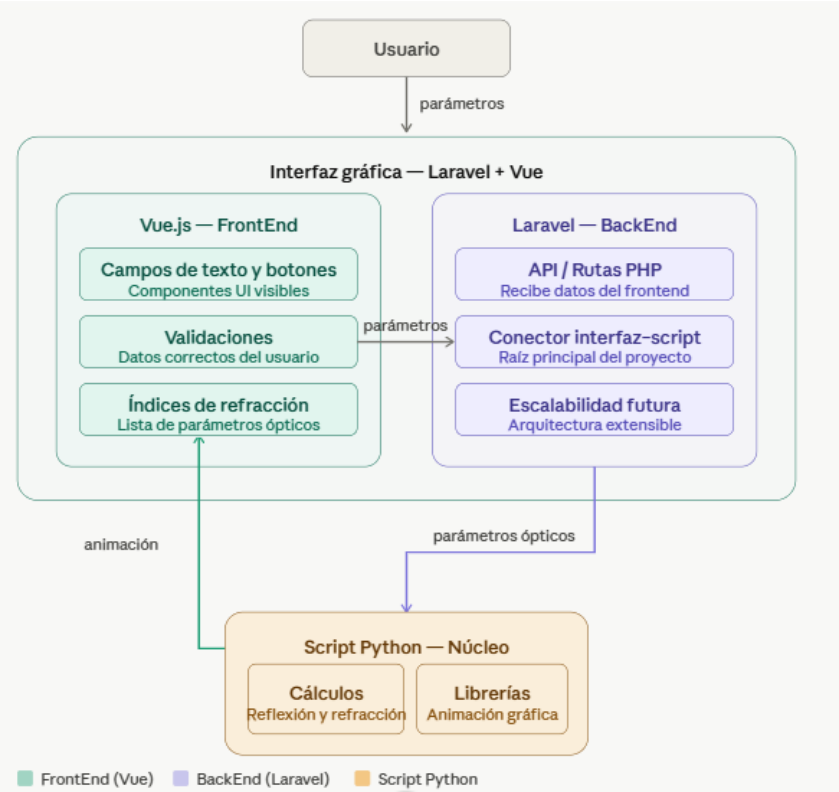


Figura 1: Diagrama de flujo de la estructura del simulador

RESULTADOS

El sistema de software facilita el entendimiento de los fenómenos reflexión y refracción de la luz. Aparte de la interactividad de la animación (que da como resultado el simulador), se pueden hacer diversas configuraciones. A continuación, se presentan imágenes presentadas por el simulador, en las cuales se muestran las dos formas de creación del rayo incidente y su propagación, permitiendo visualizar de manera clara los fenómenos de reflexión y refracción. Estas presentaciones permiten visualizar de manera clara el comportamiento de los fenómenos de reflexión y refracción de la luz bajo diferentes configuraciones establecidas por el usuario. En la figura 2 se muestra la generación del rayo incidente a partir del ángulo de incidencia, donde el usuario indica este parámetro y el sistema construye automáticamente la trayectoria del rayo, así como los rayos reflejado y refractado, de acuerdo con las leyes de la física correspondiente.



Figura 2: Interfaz del simulador en la opción de ángulo de incidencia

Por otra parte, la figura 3 muestra la generación a partir de las coordenadas del punto de inicio del rayo incidente, de esta manera podremos visualizar de diferentes formas la propagación de estos fenómenos.



Figura 3: Interfaz del simulador en la opción de coordenadas del punto inicial de rayo incidente

En ambas opciones, el punto incidencia con la superficie se mantiene constante, lo cual garantiza la coherencia física del modelo. Asimismo, el simulador permite modificar los índices de refracción, tanto del medio de propagación e incidente. Estas visualizaciones no solo permiten validar el funcionamiento del simulador, sino que también constituye a una herramienta didáctica que favorece la comprensión de los conceptos fundamentales de la óptica geométrica.

CONCLUSIÓN

Con esta propuesta, se crea una herramienta computacional que permite visualizar y modelar los fenómenos de reflexión y refracción en un entorno tridimensional. A través de ésta, se logra representar la teoría e interpretar conceptos fundamentales como la ley de snell y calculo vectorial, demostrando que la programación es una herramienta pedagógica para quien construye el sistema. Por otra parte, el simulador no necesita un equipo costoso, ni el pago de suscripción para uso; cualquier persona con acceso a internet podrá experimentar con diferentes materiales, lo que favorece un aprendizaje más dinámica, accesible y fácil de recordar.

BIBLIOGRAFIA

1. Hecht, E. (2017). Óptica (5ta ed.). Pearson Educación.
2. Halliday, D., Resnick, R., Krane, K. (1994). FÍSICA VOL.2 (3ra ed.). COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. de C.V.
3. Serway, R. A., Jewett, J. W. (2018). Física para ciencias e ingeniería (10 ed.). Cengage Learning.
4. Laravel, “Arquitectura en general”, Laravel Doc. [En línea]. Disponible en: https://laravel.com/, [Accedido: 01-abr-2026].
5. Python Software Foundation. (s.f.). The Python Standard Library. Python 3.12.2 Doc. Recuperado el 1 de abril de 2026, de https://docs.python.org/3/library/

VALORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DOSIMÉTRICA DE UN SISTEMA DE IRRADIACIÓN DE RAYOS X BASADO EN EL GENERADOR PIROELÉCTRICO COOLX MEDIANTE MCNPX

Elizabeth Vega Moreno[1], Zaida Irazú Téllez Pérez[2], Jorge Luis Rodríguez Alejandre[4], Gonzalo Viramontes Gamboa[3], Nabanita Dasgupta-Schubert[3]

[1]Programa de Maestría en Ingeniería Física, UMSNH, [2]Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas, UMSNH, [3]Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UMSNH, [4]Instituto Tecnológico de Morelia

2535901j@umich.mx

RESUMEN

La caracterización precisa de sistemas de irradiación es un requisito previo indispensable para garantizar la seguridad y reproducibilidad en aplicaciones experimentales. Este trabajo aborda la necesidad de establecer un modelo computacional robusto para el generador de rayos X piroeléctrico CoolX, un dispositivo que utiliza las propiedades térmicas de cristales para producir radiación sin fuentes de alta tensión externas. El estudio se centró en la recreación detallada del sistema de irradiación, compuesto por una cámara blindada, utilizando el código de transporte de partículas MCNPX basado en el método estadístico de Monte Carlo. La metodología incluyó el modelado geométrico de la fuente y la caja, seguido de una fase de validación mediante la comparación de la distribución de partículas centradas a la energía 8.04 keV a una distancia de 10 cm con los perfiles de emisión proporcionados por el fabricante. Adicionalmente, se integró en el modelo una placa de Petri con recubrimiento de aluminio para evaluar la uniformidad del flujo en la superficie de interés para muestras biológicas. Los resultados mostraron que el sistema simulado genera un perfil de emisión en forma de campana a la distancia de trabajo seleccionada, que se asemeja mucho a la tendencia de la caracterización oficial del dispositivo. El rastreo de trayectorias confirmó que las partículas alcanzan la superficie interna de la placa de Petri de manera homogénea, lo que garantiza una exposición uniforme independientemente de la posición exacta de las pequeñas muestras colocadas dentro de la placa de Petri. Respecto a la seguridad radiológica, el análisis de la tasa de dosis en función de la distancia reveló que el blindaje compuesto por madera y acero inoxidable es suficiente para atenuar completamente la radiación dentro del espesor de las paredes del sistema. Se concluye que el modelo desarrollado es una representación fiel y validada del sistema físico, estableciendo los parámetros óptimos de operación y sirviendo como plataforma fundamental para futuros cálculos de dosis absorbida y optimización de protocolos de irradiación dentro de esta infraestructura.

INTRODUCCIÓN

La caracterización y validación dosimétrica de los sistemas de emisión de radiación ionizante constituyen un pilar fundamental en la física médica y la radiobiología experimental. La predictibilidad en la deposición de la energía y la homogeneidad del flujo de fotones sobre los blancos biológicos o materiales son condiciones críticas para asegurar que los efectos observados correspondan unívocamente a las dosis planificadas. Convencionalmente, los sistemas de irradiación de rayos X a nivel de laboratorio han dependido de tubos de emisión basados en filamentos térmicos y fuentes de alta tensión externas de gran envergadura. Sin embargo, el advenimiento de tecnologías compactas basadas en cristales piroeléctricos, tales como el generador CoolX de Amptek®, ha modificado el paradigma de la producción de rayos X de baja energía. Este dispositivo aprovecha las variaciones térmicas aplicadas a un cristal piroeléctrico para inducir campos eléctricos de gran magnitud, acelerando electrones hacia un blanco metálico y generando líneas de emisión características y radiación de Bremsstrahlung sin necesidad de fuentes eléctricas externas.

A pesar de las ventajas operativas y la portabilidad del generador CoolX, la geometría de emisión y la dinámica del flujo de partículas plantean retos significativos para la dosimetría convencional. Los modelos analíticos clásicos fundamentados en la aproximación de fuentes puntuales infinitesimales presentan desviaciones sistemáticas cuando se aplican a distancias cortas de trabajo o cuando interactúan con las estructuras de confinamiento de una cámara de irradiación. Por consiguiente, resulta indispensable la implementación de métodos numéricos avanzados de transporte estocástico de radiación. El código Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPX) proporciona una plataforma óptima para la resolución de la ecuación de transporte de Boltzmann en geometrías tridimensionales complejas, permitiendo modelar de forma discreta tanto la dispersión angular intrínseca de la fuente piroeléctrica como los fenómenos de atenuación y esparcimiento (scattering) en los materiales estructurales del blindaje.

El objetivo central del presente manuscrito es desarrollar, validar y caracterizar dosimétricamente un modelo computacional tridimensional en MCNPX 2.7.0 que reproduzca fielmente el comportamiento del generador CoolX integrado en una cámara de irradiación blindada. Se describe la metodología analítica para transicionar desde la aproximación idealizada de Beer-Lambert hacia un esquema estocástico superficial distribuido. Asimismo, se evalúa cuantitativamente la homogeneidad del flujo de fotones incidente sobre un portamuestras tipo placa de Petri y se dictamina la eficacia estructural del blindaje de la cámara en términos de seguridad radiológica ocupacional, contrastando los perfiles de tasa de dosis obtenidos con los límites internacionales recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

TEORÍA

Aproximaciones analíticas clásicas y sus limitaciones

El análisis predictivo de la atenuación de un haz de fotones monocromático o colimado al atravesar una barrera material se rige tradicionalmente por la ley analítica de Beer-Lambert. Esta formulación matemática establece que la intensidad remanente ($\boldsymbol{I}$) del haz disminuye exponencialmente en función del espesor del medio absorbente ($\boldsymbol{x}$) y de su correspondiente coeficiente lineal de atenuación ($\boldsymbol{\mu}$), de acuerdo con la expresión:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I_0}\, \boldsymbol{e^{-\mu x}} \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{I_0}$ representa la intensidad del flujo de radiación incidente inicial. Si bien la ecuación (1) es ampliamente exacta para haces paralelos y geometrías idealizadas de haz estrecho, su aplicabilidad se ve severamente limitada en escenarios donde la fuente de radiación exhibe una distribución superficial extendida en lugar de una naturaleza puntual infinitesimal. Bajo condiciones reales dentro de una cámara de confinamiento, los fenómenos de dispersión múltiple (efecto Compton y dispersión coherente de Rayleigh), así como la producción de fluorescencia secundaria, generan un componente de radiación dispersa que la ley de Beer-Lambert no contabiliza de manera nativa, subestimando la tasa de dosis en la periferia exterior de las estructuras.

Método de Monte Carlo y el código MCNPX

Para superar las restricciones de los modelos deterministas y analíticos, el método estocástico de Monte Carlo implementado en el código MCNPX discretiza el transporte de radiación mediante la simulación de las trayectorias individuales de millones de partículas (fotones y electrones). Las interacciones probabilísticas se gobiernan por secciones eficaces extraídas de bases de datos evaluadas. El código muestrea variables aleatorias a partir de distribuciones de probabilidad físicas para determinar el libre camino medio de los fotones, el tipo de interacción sufrido en el medio (efecto fotoeléctrico, dispersión Compton o producción de pares) y la dirección y energía de las partículas secundarias resultantes.

En este estudio, el transporte de fotones se analiza acoplando la definición de una fuente distribuida sobre una superficie circular en la tarjeta SDEF (Source Definition) de MCNPX, modelando el espectro de emisión continuo del blanco de Bremsstrahlung del generador piroeléctrico hasta su

energía máxima de corte. La convergencia estadística de los cálculos se asegura mediante el monitoreo de los errores relativos en los estimadores (tallies) empleados, garantizando valores inferiores al 5% en las regiones de interés dosimétrico.

PARTE EXPERIMENTAL

Modelado geométrico y estructural del sistema

El sistema físico de irradiación fue modelado computacionalmente respetando de forma estricta las dimensiones volumétricas y la composición química de los materiales reales. El diseño geométrico tridimensional y la distribución espacial de los componentes dentro del volumen de confinamiento se presentan de forma detallada en la figura 1. El dispositivo consta de una cámara cúbica exterior con aristas basales de 27 cm y una altura total de 50 cm, la cual aloja en su sección superior el generador de rayos X piroeléctrico CoolX de Amptek®. La configuración del bloque de emisión, el cristal piroeléctrico y los componentes internos del módulo se esquematizan en la figura 2. Las paredes perimetrales de la cámara constituyen el blindaje estructural, el cual se diseñó de forma compuesta utilizando paneles multicapa de madera de alta densidad y láminas de acero inoxidable.

En el interior de la cámara, suspendida a una distancia vertical de trabajo de 10 cm respecto a la ventana de salida del generador de rayos X, se posicionó una placa de Petri destinada a contener las muestras biológicas bajo estudio. Con el propósito de evaluar las perturbaciones en el campo de radiación y optimizar la dispersión, la placa de Petri se modeló incluyendo un recubrimiento base de aluminio de alta pureza.

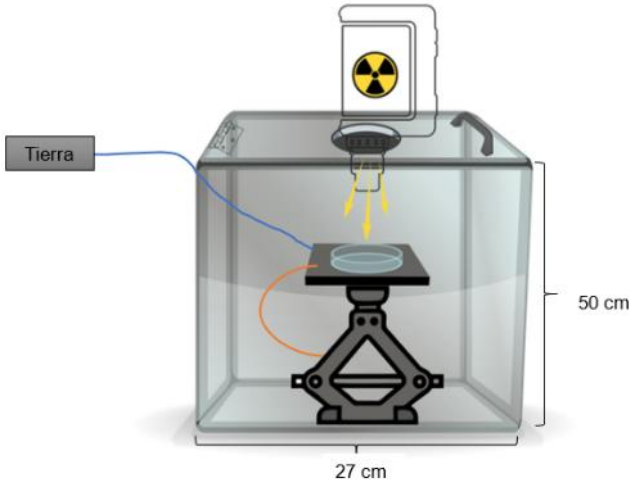


Figura 1: Representación esquemática del sistema de irradiación blindado y modelado geométrico del generador de rayos X piroeléctrico CoolX (Imagen de Zaida Irazú Téllez Pérez).

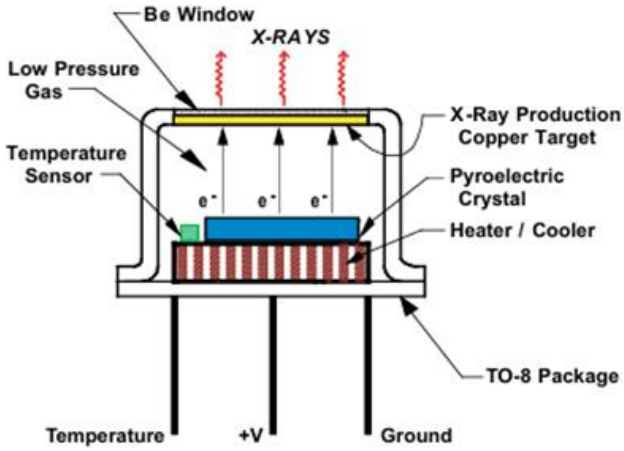


Figura 2: Arquitectura interna y componentes del generador piroeléctrico de rayos X de baja energía CoolX.

Configuración de la fuente piroeléctrica y espectro de emisión

A diferencia de los filamentos convencionales, el módulo CoolX opera mediante ciclos térmicos alternados (fases de calentamiento y enfriamiento) que inducen la polarización espontánea del cristal. El espectro de emisión de la fuente integrada en la tarjeta SDEF se configuró incorporando el continuo de Bremsstrahlung con un voltaje de pico de hasta 35 kV, modulado con las líneas de emisión características del material del blanco (línea de energía centrada predominantemente a 8.04 keV correspondiente a las transiciones del elemento de la diana). El perfil continuo de Bremsstrahlung y la intensidad relativa de las líneas características resultantes se muestran en la figura 3. La geometría de la fuente se definió como una superficie circular plana paralela al plano de la placa de Petri para emular el área activa del cristal emisor. El espectro energético de emisión de Bremsstrahlung configurado y el comportamiento visual del transporte estocástico de los fotones al interactuar con el medio se ilustran en la figura 4.

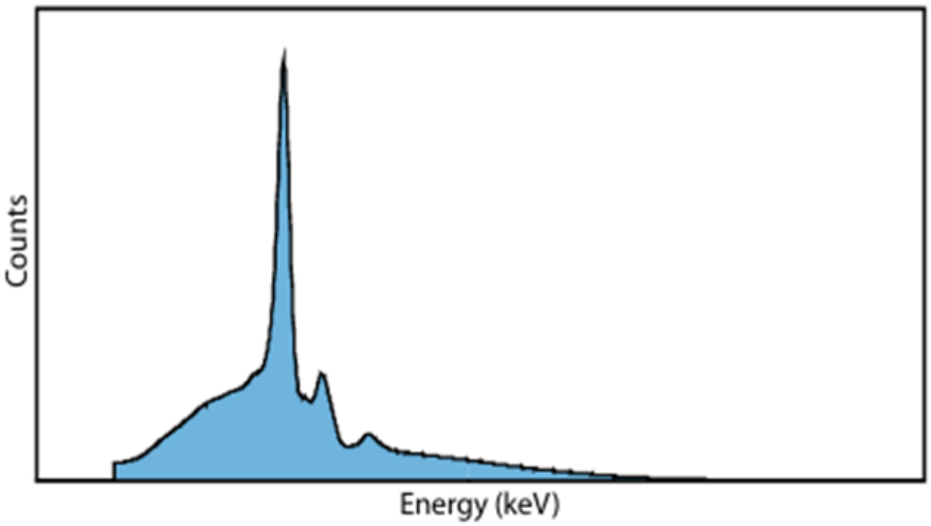


Figura 3: Espectro energético de emisión del generador de rayos X que muestra el continuo de Bremsstrahlung y las líneas características del blanco metálico.

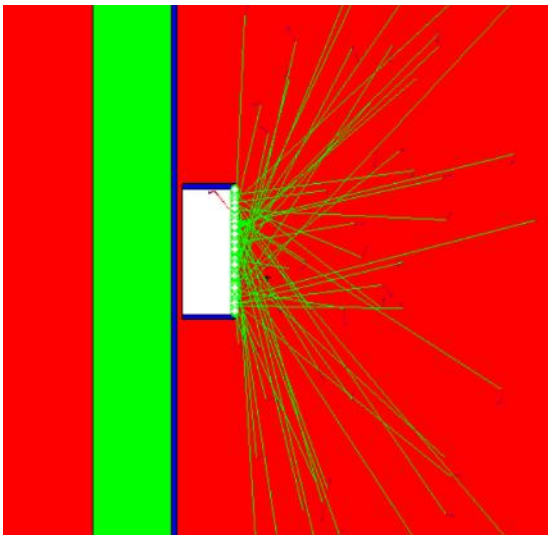


Figura 4: Espectro energético continuo de la fuente piroeléctrica y visualización del rastreo de trayectorias de fotones mediante el código MCNPX.

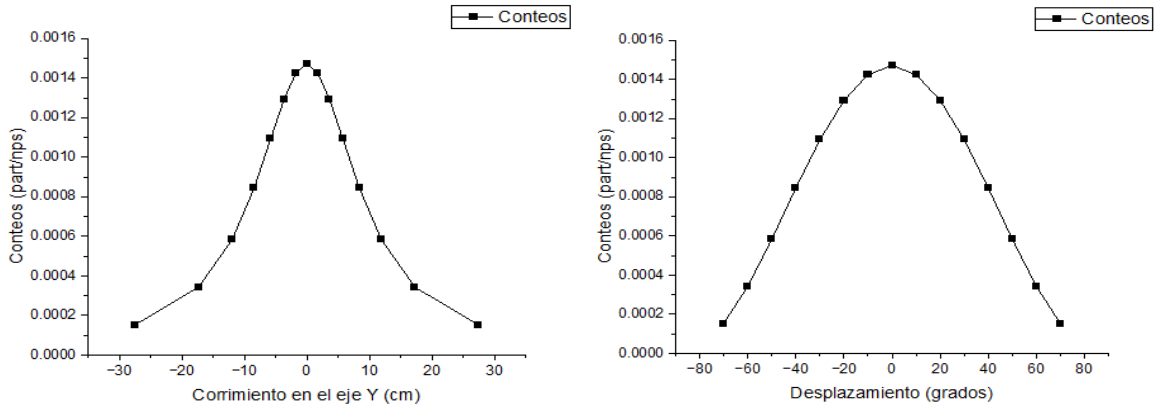
Estimadores dosimétricos (Tallies) implementados

Para evaluar cuantitativamente el flujo y la tasa de dosis, se distribuyó una malla de estimadores tipo F4 (flujo medio en una celda) y F5 (detector puntual) en posiciones estratégicas del espacio virtual. Para el análisis de la uniformidad del haz en la superficie de la muestra, se utilizaron tarjetas de segmentación geométrica en el eje horizontal, registrando el número de partículas que impactan el área útil de la placa de Petri en función del desplazamiento radial. Para el estudio de protección radiológica, se dispuso un arreglo lineal de detectores a lo largo del eje vertical y horizontal, cruzando las paredes del blindaje de madera y acero hasta una distancia exterior de 60 cm respecto al centro geométrico de la fuente. Los flujos de fotones tabulados fueron transformados a unidades de tasa de dosis equivalente ambiental ($\mu Sv/h$) aplicando los factores de conversión de flujo a dosis basados en las recomendaciones de la publicación 103 de la ICRP.

RESULTADOS

Validación del perfil angular y simetría del haz

La fase inicial de validación del modelo consistió en contrastar la distribución espacial de los fotones simulados con las especificaciones nominales proporcionadas por el fabricante del dispositivo. Se evaluó el número de partículas que impactan el área de interés a la distancia de 10 cm desde la ventana del generador de rayos X. Los registros computacionales del conteo de partículas en función del desplazamiento en el plano horizontal revelaron un perfil de emisión simétrico con una marcada geometría en forma de campana (distribución gaussiana). Este perfil describe con alta fidelidad la dispersión angular intrínseca del sistema piroeléctrico, confirmando que la aproximación de fuente superficial distribuida implementada en MCNPX modela adecuadamente las características reales de la divergencia del haz. Los perfiles numéricos correspondientes al conteo de partículas en función del desplazamiento horizontal en el eje Y, así como la distribución angular resultante a la distancia de trabajo, se despliegan en la figura 5.



a) **b)**

Figura 5: Simetría del flujo de fotones incidente a una distancia vertical de 10 cm: (a) conteos en función del desplazamiento horizontal y (b) perfil de distribución angular.

Análisis de homogeneidad en la zona de irradiación

El rastreo tridimensional de trayectorias estocásticas demostró que los fotones incidentes convergen sobre la superficie interna de la placa de Petri con una distribución de flujo espacialmente homogénea en la zona central de exposición. La incorporación del recubrimiento de aluminio actúa como un elemento moderador del flujo que suaviza las variaciones angulares extremas. Esto garantiza que las muestras biológicas o químicas depositadas en la placa experimentarán un campo de radiación uniforme, minimizando los gradientes de dosis espaciales y asegurando la reproducibilidad de los ensayos experimentales independientemente del posicionamiento específico de la muestra dentro del portamuestras.

Evaluación de la eficiencia del blindaje y seguridad radiológica

El resultado crítico para dictaminar la viabilidad operativa del sistema se centró en la atenuación de la tasa de dosis en función de la distancia radial desde el núcleo de la fuente piroeléctrica. Los datos vectoriales procesados evidenciaron una disminución progresiva del nivel de radiación en el espacio de aire interno de la cámara, seguida de una caída abrupta y total de la tasa de dosis justamente al alcanzar el radio correspondiente a la ubicación de las paredes estructurales del blindaje compuesto de madera y acero inoxidable (región comprendida entre los 40 y 45 cm desde el origen).

Al contrastar estos valores con el límite internacional de seguridad para el personal ocupacionalmente expuesto fijado por la ICRP (fijado en 2.3 $\boldsymbol{\mu Sv/h}$), se constató que los niveles de radiación residual en la periferia externa del dispositivo (distancias >45 cm) se sitúan muy por debajo de dicho umbral, arrojando valores mínimos e infinitesimales (< 1 $\boldsymbol{\mu Sv/h}$). Esto demuestra de forma concluyente que los espesores de blindaje calculados absorben en su totalidad el espectro continuo de Bremsstrahlung, mitigando todo riesgo radiológico para el operador del laboratorio. El perfil de atenuación dosimétrica y la comparación directa con el umbral normativo internacional se detallan en la figura 6.

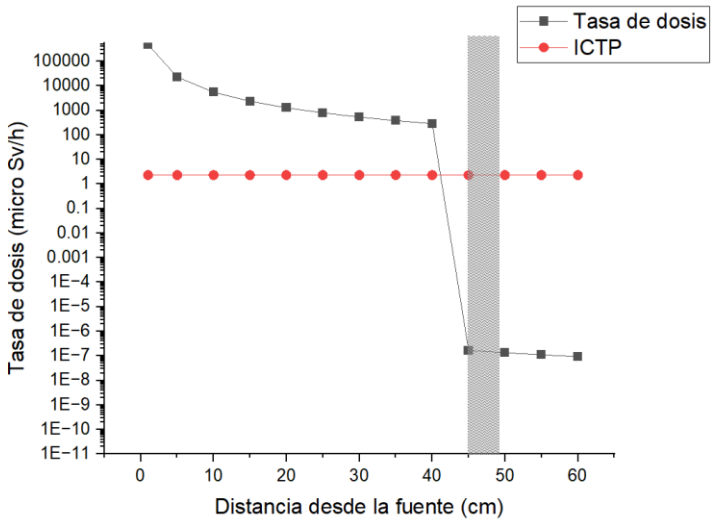


Figura 6: Tasa de dosis equivalente ambiental ($\mu Sv/h$) en función de la distancia radial a la fuente y su contraste con el límite de seguridad ocupacional establecido por la ICRP.

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del modelo computacional tridimensional en el código MCNPX 2.7.0 permitió llevar a cabo con éxito la validación geométrica y la caracterización dosimétrica fina del sistema de irradiación basado en el generador piroeléctrico CoolX. Se validó de forma cuantitativa el perfil del haz de radiación, reproduciendo con alta fidelidad la simetría en forma de campana característica de las emisiones de Amptek®, lo cual corrobora que la aproximación estocástica por fuentes distribuidas aventaja significativamente a los modelos clásicos lineales. Adicionalmente, se demostró la total eficacia estructural del blindaje compuesto de madera y acero inoxidable; las tasas de dosis experimentan una atenuación absoluta dentro del espesor material de la cámara, garantizando niveles residuales perimetrales muy por debajo de los límites restrictivos internacionales de 2.3 $\mu Sv/h$ dictaminados por la ICRP para la protección del personal. Se concluye que el modelo virtual constituye una plataforma dosimétrica calibrada y segura, idónea para guiar las futuras fases de optimización y planeación de dosis absorbida en muestras biológicas dentro de la institución.

BIBLIOGRAFÍA

1. Amptek Inc., “Cool-X Pyroelectric X-Ray Generator User's Guide and Technical Specifications”, Amptek, Inc., Bedford, MA, USA, 2010, pp. 1-25.
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP), “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103”, Annals of the ICRP, Vol. 37, No. 2-4, 2007, pp. 1-332.
3. D. B. Pelowitz (Ed.), “MCNPX User's Manual, Version 2.7.0”, Los Alamos National Laboratory, Report LA-CP-11-00438, Los Alamos, NM, USA, 2011, pp. 105-240.

CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA EN EL MUNICIPIO DE MISANTLA VERACRUZ Y LA REGIÓN NAUTLA

José Salas-Martínez[1,2], Pedro Arguijo[2], Aldo Márquez-Grajales[3], Fernando Salas-Martínez[4]

[1]Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, [2]División de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, [3]Área Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,[4]Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

jsalasm@itsm.edu.mx

RESUMEN

La Isla de Calor Urbana (UHI, por sus siglas en inglés) representa uno de los mayores problemas relacionados con el cambio climático, la UHI es más notoria en ciudades con crecimiento urbano acelerado y sin una clara planificación territorial. El objetivo de este trabajo consiste en clasificar y evaluar el comportamiento de la UHI utilizando imágenes multiespectrales y técnicas de visión por computadora en el municipio de Misantla, Veracruz, México y la Región Nautla a la que pertenece dicho municipio. Para la estimación de la UHI se emplearon las imágenes multiespectrales Landsat 8-9 del Servicio Geológico de Estados Unidos, del periodo 2013 – 2024, que permiten estimar valores de radiancia y reflectancia (TOA) usando correcciones radiométricas, además, se calculó la temperatura de brillo (BT) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para determinar la emisividad superficial, la temperatura superficial del suelo (LST) y la UHI. En diversos estudios la selección de imágenes suele restringirse a periodos específicos del año en los que se asume la presencia de condiciones atmosféricas despejadas, particularmente durante estaciones secas o meses asociados con menor nubosidad. Esta práctica, aunque operativamente es conveniente, puede limitar el análisis a ventanas temporales reducidas y excluir otros periodos potencialmente representativos. En este trabajo se consideró el periodo antes mencionado incluyendo los días que presentan nubosidad. A estas imágenes se les extrajo características de textura de segundo grado, conocidas como características de Haralick las cuales se obtienen de la GLCM (Gray Level Co-ocurrence Matrix). Este conjunto desbalanceado de características permite la clasificación automática de las imágenes, con la finalidad de evitar una clasificación manual, lo cual evita la utilización de subconjuntos temporales acotados. Las características se clasificaron con diversos algoritmos de aprendizaje automático, como son SVM (Maquina de Soporte Vectorial) y RF (Bosques Aleatorios), con la finalidad de evitar un sobre entrenamiento se implementó validación cruzada con 5 folds, esto sin la necesidad del aumento de datos. Los resultados obtenidos indican que las características de textura facilitan la clasificación de días nublados y soleados, cuyos resultados son de una Precisión macro y F1-score macro superior al 93%, para los clasificadores señalados.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los problemas más estudiado a nivel global está relacionado con el cambio climático. Dentro de estos se encuentra uno de los fenómenos que afectan tanto a la calidad de vida como al clima local de las ciudades, derivado de la transformación del espacio natural del entorno. Dicho fenómeno se conoce como Isla de Calor Urbano (UHI por sus siglas en inglés). La UHI es bastante notoria en ciudades en vías de desarrollo, provocada por diversos factores que conlleva la urbanización, como la construcción de corredores residenciales e industriales, el tipo de material para obra (hormigón, asfalto y baldosas), la deforestación de la poca vegetación presente en ellas, así como diversos contaminantes, los cuales generan un incremento directo en la temperatura [1, 2]. La UHI se considera como uno de los fenómenos climáticos más importantes de la actualidad, debido a su capacidad para evidenciar las diferencias entre las temperaturas que se presentan en las zonas urbanas comparadas con las exhibidas en zonas rurales [3]. Este fenómeno permite conocer cómo es que las temperaturas se intensifican y modifican los microclimas de las ciudades.

A nivel mundial la UHI ha sido estudiada y se han documentado sus principales consecuencias. Diferentes trabajos han expuesto implicaciones ambientales relevantes, tales como el comportamiento del fenómeno en condiciones extremas de calor en Alemania, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de ecologización urbana, incluida la urgencia de proporcionar más áreas verdes, ya que las características físicas del entorno influyen directamente en la intensidad del fenómeno [4, 5]. En el ámbito social, se ha asociado este problema con riesgos a la salud pública, evidenciando el aumento de la mortalidad por el calor en China, así como propiciar estrés térmico a los pobladores de grandes ciudades e inclusive actuar como factor que agrava significativamente los riesgos de enfermedades cardiovasculares [6-8]. Así mismo, se han documentado implicaciones económicas, siendo una de ellas el aumento del consumo energético para el enfriamiento de edificios en los Estados Unidos [9].

En México poco se ha reportado sobre sus implicaciones; sin embargo, existe registro del estudio de la UHI en diferentes metrópolis del país, en las cuales se han reportado diferencias térmicas claras entre zonas urbanas y rurales. En la zona centro del país existen reportes de +7.1°C en la Ciudad de México [10], +12.2 °C en la ciudad de Toluca [11] y +4.2°C en la ciudad de Querétaro [12]. En el norte hay estudios que indican +5.4° C en la ciudad de Mexicali [13], +6°C en Ciudad Juárez [14], +4°C en la ciudad de Hermosillo [15] y +4.9°C en la ciudad de Tampico [16]. Sin embargo, en el sur, poco se ha estudiado del tema, +5°C en la ciudad de Tuxtla [17] y +2°C en la ciudad de Xalapa [18]. A pesar de que se ha estudiado dicho fenómeno a través del uso de datos obtenidos de diferentes formas, pocos son reportados utilizando imágenes satelitales [1, 11, 19]. En México, el estudio de la UHI se ha desarrollado predominantemente a partir de registros instrumentales de temperatura del aire obtenidos con estaciones meteorológicas convencionales; no obstante, este enfoque presenta limitaciones espaciales, ya que la teledetección térmica permite obtener una visión continua y simultánea de toda la ciudad, lo cual resulta fundamental para el análisis detallado del clima superficial urbano [20]. En contraste, las imágenes satelitales permiten observar los patrones espaciales de la radiancia térmica emitida por la superficie urbana, es decir, la denominada isla de calor urbana superficial (SUHI, por sus siglas en inglés) [21]. Además, la temperatura superficial, derivada de sensores térmicos, ha mostrado una estrecha correspondencia con la distribución del uso y la cobertura del suelo, lo que fortalece su aplicación [20, 21].

Entre los diferentes estudios que emplean imágenes satelitales para estimar la UHI, la selección de imágenes suele restringirse a periodos específicos del año, en los que se asume la presencia de condiciones atmosféricas despejadas, particularmente durante las estaciones secas o en meses con menor nubosidad. Esta práctica, aunque operativamente conveniente, puede limitar el análisis a ventanas temporales reducidas y excluir otros periodos potencialmente representativos. La clasificación manual de imágenes resulta una tarea laboriosa cuando se trabaja con series extensas de datos, lo que, en muchos casos, conduce a recurrir a subconjuntos temporales acotados.

Debido a que en Veracruz el reporte del fenómeno solo se ha centrado en la capital bajo métodos instrumentales, y no se ha analizado un gran periodo de tiempo para el cálculo del fenómeno, existe un vacío de conocimiento que puede ser explorado. Es así que la presente investigación tiene como objetivo analizar la temperatura superficial (LST) estimada a partir de imágenes multiespectrales Landsat 8 correspondientes al periodo 2013–2024, con la finalidad de determinar la presencia de la UHI en la ciudad de Misantla, Veracruz, así como generar la implementación de un esquema de clasificación automática del conjunto de imágenes que permita filtrar de manera sistemática aquellas que cumplen con los criterios climáticos necesarios para el cálculo de la UHI. Consideramos que el esquema de clasificación automática permite identificar, con un alto nivel de precisión, las imágenes despejadas en el conjunto de imágenes de Landsat 8. De acuerdo con la literatura consideramos una metodología ampliamente estudiada y basada principalmente en el cálculo de la LST y así estimar la temperatura del área urbana y rural [1, 22]. En las siguientes secciones mostramos la fundamentación y experimentos que realizamos para determinar, clasificar y caracterizar la UHI.

TEORÍA

Existen diversa metodologías propuestas para estimar la UHI, entre las que se encuentra el cálculo de diversos índices como son: el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus

siglas en inglés), el índice de área edificada de diferencia normalizada (NDBI, por sus siglas en inglés), el índice de vegetación mejorado (EVI, por sus siglas en inglés), el índice de edificación basado en índices (IBI, por sus siglas en inglés), el índice de desnudez de diferencia normalizada (NDBaI, por sus siglas en inglés) y el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés); lo cual genera diversos problemas al considerar los diversos umbrales entre los que se manejan los mismos, generando así un estudio basado en ensayos de prueba y error, volviendo complicado este tipo de investigaciones [22].

En la Figura 1 proponemos la metodología para determinar el cálculo de la LST y UHI de acuerdo con un estudio en México durante el año 2020, en el cual se estima la SUHI, con la diferencia significativa en la ventana de tiempo y la cantidad de imágenes que se consideraron para el presente documento [1].

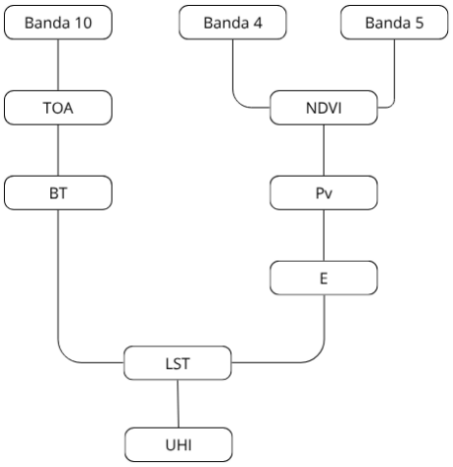


Figura 1 Diagrama de flujo para el cálculo de la UHI.

Para estimar la UHI de acuerdo con la metodología propuesta se utilizaron imágenes multiespectrales tomadas por el satélite LANDSAT 8-9 (OLI/TIRS), mismas que se procesaron mediante un conjunto de operaciones usando la calculadora de imágenes ráster de ArcGIS, considerando tres bandas, la banda número 4 asociada al rojo ($\boldsymbol{B_4}$, reflectancia media en el infrarrojo cercano), la banda 5 asociada al infrarrojo térmico ($\boldsymbol{B_5}$, reflectancia correspondientes a las bandas de onda roja), ambas usadas para determinar NDVI [3-5]:

$$\boldsymbol{NDVI} = \frac{\boldsymbol{B_5} - \boldsymbol{B_4}}{\boldsymbol{B_5} + \boldsymbol{B_4}}$$

De la cual se extraen dos valores el $\boldsymbol{NDVI_s}$ y $\boldsymbol{NDVI_v}$, mismos que son los valores de referencia del suelo y la vegetación. Por otra parte, la banda 10 ($\boldsymbol{B_{10}}$) asociada al infrarrojo térmico (TIRS), en la cual se registra la radiancia térmica que es emitida por la superficie de la tierra. Por un lado, se calculó la radiancia espectral TOA (Top Of Atmospheric) [3-5]:

$$\boldsymbol{TOA} = (\boldsymbol{M} * \boldsymbol{B_{10}}) + \boldsymbol{A}$$

Donde $\boldsymbol{M}$ es el parámetro asociado al factor de escala multiplicativo especifico de la banda 10 y $\boldsymbol{A}$ se asocia al factor de escala aditivo especifico a partir de los metadatos de la misma banda. Después se estima la conversión del TOA a temperatura de brillo BT (Brightness Temeperature) [3-5]:

$$BT = \left(\frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{TOA} + 1\right)}\right) - 273.15$$

De la cual K_1 y K_2 son las constantes de conversión térmica especifica de los metadatos de la banda con los valores $NDVI_s$ y $NDVI_v$, considerados como el valor mínimo y máximo de dicho índice, para así calcular la proporción de vegetación (P_v) [3-5]:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}\right)^2$$

Con la imagen obtenida de la proporción de la vegetación se estima la Emisividad (ε) [3-5]:

$$\varepsilon = (0.004 * P_v) + 0.986$$

Además, se calcula la temperatura de la superficie de la tierra LST [3-5]:

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \frac{(10.895 * B_k)}{14388} * ln(\varepsilon)\right)} \quad donde \quad B_k = \frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{TOA} + 1\right)}$$

Finalmente se realizó el cálculo de la UHI el cual queda dado por las LST_u y LST_r, los cuales son los valores de la LST urbana y rural, mismos que coinciden con el valor de la media y la desviación estándar de las temperaturas respectivamente [3-5]:

$$UHI = \frac{(LST - LST_u)}{LST_r}$$

Para determinar la extracción de características se utilizó GLCM para determinar los diversos patrones de textura que se exhiben en el conjunto de imágenes. Las características de Haralick extraídas de GLCM permiten conocer las representaciones de imágenes entre las que presentan nubosidad o son despejadas. Para la extracción de características de Haralick se consideraron el promedio de las cuatro direcciones y 256 niveles de gris.

Siguiendo las recomendaciones identificadas en trabajos previos, se analizaron diversos aspectos relacionados con la extracción de características de textura de Haralick, las cuales se obtienen de la matriz de coocurrencia de niveles de gris (GLCM). Diversos autores señalan que este método es sensible al número de niveles de gris utilizados durante la construcción de la matriz de coocurrencia, usualmente se considera realizar una cuantización de los niveles de gris. Sin embargo, en el presente trabajo esto no se consideró. Asimismo, algunos trabajos proponen utilizar Análisis de Componentes Principales (PCA) para reducir la correlación existente entre las características extraídas mediante GLCM y, con ello, mejorar el desempeño de los clasificadores. No obstante, tampoco se utilizó PCA, ya que uno de los objetivos principales es analizar el comportamiento individual de las características de textura mediante la comparación de distintos clasificadores. De esta manera, es posible evaluar directamente la contribución de cada característica al proceso de clasificación, evitando que una transformación previa de los datos influya en la interpretación de los resultados [23-26].

Se realizó la extracción de características de textura de Haralick. Estas características representan cada imagen con un vector cuantitativas que describen la textura presente en la imagen. Entre las características extraídas se encuentran: autocorrelation, cluster prominence, cluster shade, contrast,

correlation, difference average, difference entropy, difference variance, dissimilarity, energy, entropy, homogeneity, information measure of correlation 1, information measure of correlation 2, inverse difference, maximal correlation coefficient, maximum probability, sum average, sum entropy, variance y sum variance. Estas métricas permiten cuantificar propiedades relacionadas con el contraste, la homogeneidad, la correlación espacial, la dispersión y la complejidad de los niveles de gris presentes en las imágenes. La representación vectorial facilita el análisis y la comparación de las diferentes coberturas terrestres, incluyendo áreas urbanas, zonas rurales y distintos tipos de vegetación. Asimismo, esta transformación convierte la información visual contenida en las imágenes en variables numéricas que pueden ser procesadas mediante técnicas de clasificación, permitiendo evaluar la capacidad descriptiva de cada característica en la discriminación de las clases de interés [23-26].

En el presente estudio se emplearon dos algoritmos de clasificación ampliamente utilizados en tareas de reconocimiento de patrones: Bosques Aleatorios (Random Forest, RF) y Máquinas de Soporte Vectorial (Support Vector Machine, SVM). La selección de estos clasificadores se fundamenta en su desempeño reportado en la literatura para problemas de clasificación basados en características extraídas de imágenes.

Por una parte, RF es uno de los algoritmos más utilizados en aplicaciones de visión artificial y teledetección debido a su capacidad para modelar relaciones no lineales, su robustez frente al ruido y su habilidad para estimar la importancia de las variables utilizadas en el proceso de clasificación. Estas características lo convierten en una alternativa adecuada para trabajar con descriptores texturales derivados de GLCM.

SVM ha demostrado un desempeño sobresaliente en problemas de clasificación binaria y en escenarios con espacios de características de alta dimensionalidad, como los generados a partir de la extracción de métricas texturales. Su capacidad para encontrar fronteras de decisión óptimas permite una adecuada discriminación entre las clases consideradas en este estudio.

La utilización de ambos algoritmos permitió realizar una comparación objetiva de su capacidad de clasificación sobre el conjunto de características extraídas. Asimismo, la evaluación de los modelos se llevó a cabo mediante validación cruzada de cinco particiones (5-fold cross-validation), con el fin de obtener estimaciones más robustas y confiables del desempeño de cada clasificador [23-26].

PARTE EXPERIMENTAL

La región Nautla ubicada al noreste del estado de Veracruz, está conformada por 11 municipio, Atzalan, Colipa, Juchique de Ferrer, Martínez de la torre, Misantla, Nautla, San Rafael, Tenochtitla, Tlapacoyan, Vega de Alatorre y Yecuatla. Por su ubicación geográfica y su proximidad con la montaña se convierte en una zona de estudio ideal debido a la presencia de una constante nubosidad, ver Figura 2, dado que existe la gran posibilidad de tener nubosidad cubriendo gran parte del municipio. Dichas imágenes fueron tomadas de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Por otra parte, se consideró el periodo 2013 – 2024 con la finalidad de tener una mayor información relacionada con el comportamiento de la UHI, en la Tabla 1 se muestran las fechas a lo largo del periodo de estudio que fueron descartadas, considerando que las imágenes satelitales son tomadas en un periodo de 16 días, lo que limita el presente trabajo a una considerable muestra de estas para el análisis del estudio [27-28].

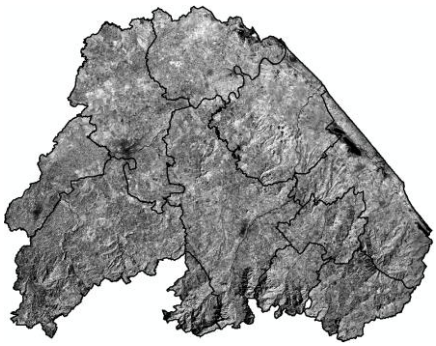


Figura 2 Mapa de la Región Nautla.

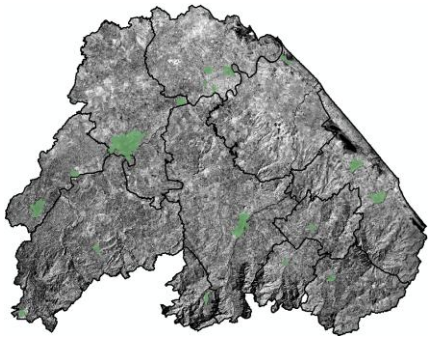


Figura 3 Zonas urbanas de la región Nautla.

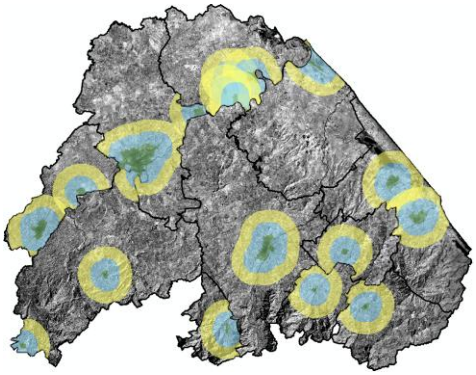


Figura 4 Zonas urbanas con discos de 2 y 4 km de radio.

Fecha	Motivo de exclusión
04/10/2013	No se encontró
20/10/2013	No se encontró
30/04/2014	No se encontró
08/11/2020	No cuenta con la banda 10
23/04/2023	No se encontró
21/12/2014	No se encontró y se reemplazó por la imagen del 29/12/2024

Tabla 1 Fechas de imágenes no encontradas en la base de datos de la USGS

En la Figura 3 se muestran la ubicación de las diferentes zonas urbanas de acuerdo con el INEGI, además, en la Figura 4 se muestra la zona urbana considerando un disco de radio igual a 2 KM y 4 KM conformando las zonas de estudio totales en dicho trabajo [27-28].

Nuestro conjunto de datos consta de un total de 264 imágenes de la LST y UHI para cada uno de los municipios, la región completa y las zonas urbanas, comprendidas en un periodo de más de 10 años, comenzado desde abril del 2013 a diciembre de 2024, durante dicho periodo las imágenes satelitales son tomadas cada 16 días, por otra parte, las imágenes fueron etiquetadas en dos la clase nublada (CN) y la clase despejada (CD), de las cuales 241 pertenecen a la primer clase y 23 a la segunda, lo anterior nos permite asegurar que el conjunto de datos está desbalanceado en una proporción 9 a 1 [23-26].

RESULTADOS

Se evaluaron los algoritmos SVM y RF para la clasificación de condiciones atmosféricas en las categorías nublado y despejado. Debido al desbalance de clases presente en el conjunto de datos, donde la categoría nublada consta de aproximadamente el 91% de las muestras, se analizaron tanto métricas globales como métricas específicas para cada clase.

Al considerar la clase nublado como referencia, SVM alcanzó una exactitud del 95%, una precisión del 96% y una sensibilidad del 97%. Por otro lado, RF obtuvo una exactitud del 97%, una precisión del 97% y una sensibilidad del 99%, mostrando un mejor desempeño general.

Para la clase minoritaria, o sea, despejado, SVM logró una precisión del 75% y una sensibilidad del 65%, mientras que Random Forest alcanzó una precisión del 89% y una sensibilidad del 73%. Estos resultados indican una mayor capacidad de Random Forest para identificar correctamente los casos correspondientes a la clase menos representada.

Las métricas promedio también favorecieron a RF, con una precisión macro y un F1-score macro del 94%, frente al 93% obtenido por SVM. En conjunto, los resultados muestran que RF supera consistentemente a SVM en todas las métricas evaluadas, proporcionando una clasificación más equilibrada y robusta.

Con el fin de evaluar la capacidad de generalización de los modelos, se aplicó una validación cruzada de 5 particiones (5-fold cross-validation), obteniéndose resultados consistentes con los observados durante la evaluación inicial. Estos se muestran en la Tabla 2.

Método	% de Fold					Promedio
	1	2	3	4	5	
SVM	92	90	88	90	88	90
RF	94	98	96	92	94	95

Tabla 2 Resultados de Validación cruzada para tres clasificadores con 5 folds.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que los algoritmos de aprendizaje automático son una alternativa eficaz para la clasificación de condiciones atmosféricas a partir de imágenes satelitales. Aunque el conjunto de datos presentó un desbalance de clases cercano a una proporción 90/10, asociado a las condiciones climatológicas predominantes del municipio de Misantla, los modelos evaluados alcanzaron un desempeño satisfactorio. Entre ellos, Random Forest mostró una mayor capacidad de discriminación y un comportamiento más robusto frente al desbalance de datos, superando consistentemente a SVM en las métricas de evaluación consideradas.

La aplicación de validación cruzada permitió corroborar la estabilidad y capacidad de generalización de los modelos, respaldando la confiabilidad de la metodología propuesta para la identificación automática de condiciones de nubosidad.

Por otra parte, la comparación entre herramientas de software libre y software especializado evidenció que es posible realizar el cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) y de la Intensidad de Isla de Calor Urbana (UHI) con resultados adecuados y en menores tiempos de

procesamiento. Esto favorece la implementación de metodologías reproducibles y de bajo costo para el monitoreo ambiental y climático.

En conjunto, la integración de técnicas de clasificación supervisada con herramientas geoespaciales constituye una estrategia eficiente para el análisis de fenómenos atmosféricos y térmicos, proporcionando información útil para estudios ambientales, de planeación territorial y de gestión urbana.

AGRADECIMIENTOS

José Salas Martínez brinda el presente agradecimiento a la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por su apreciable contribución a esta investigación, No. de CVU 2026479.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. L. Medina-Fernández, J. M. Núñez, I. Barrera-Alarcón, y D. A. Perez-DeLaMora, “Surface Urban Heat Island and Thermal Profiles Using Digital Image Analysis of Cities in the El Bajío Industrial Corridor, Mexico, in 2020”, Earth (Switzerland), vol. 4, núm. 1, pp. 93–150, mar. 2023, doi: 10.3390/earth4010007.
2. S. Ghorbany, M. Hu, S. Yao, y C. Wang, “Towards a Sustainable Urban Future: A Comprehensive Review of Urban Heat Island Research Technologies and Machine Learning Approaches”, el 1 de junio de 2024, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/su16114609.
3. L. Zhao, X. Fan, y T. Hong, “Urban Heat Island Effect: Remote Sensing Monitoring and Assessment—Methods, Applications, and Future Directions”, el 1 de julio de 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/atmos16070791.
4. N. Kabisch, F. Remahne, C. Ilsemann, y L. Fricke, “The urban heat island under extreme heat conditions: a case study of Hannover, Germany”, Sci. Rep., vol. 13, núm. 1, dic. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-49058-5.
5. C. Huang, K. Liu, T. Ma, H. Xue, P. Wang, y L. Li, “Analysis of the impact mechanisms and driving factors of urban spatial morphology on urban heat islands”, Sci. Rep., vol. 15, núm. 1, dic. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-04025-0.
6. Y. Huang et al., “Association between urban heat islands and heat-related mortality in 70 pairs of adjacent urban-rural counties among 8 topographic regions in China”, Sustain. Cities Soc., vol. 121, mar. 2025, doi: 10.1016/j.scs.2025.106182.
7. S. Nanayakkara, W. Wang, J. Cao, J. Wang, y W. Zhou, “Analysis of Urban Heat Island Effect, Heat Stress and Public Health in Colombo, Sri Lanka and Shenzhen, China”, Atmosphere (Basel)., vol. 14, núm. 5, may 2023, doi: 10.3390/atmos14050839.
8. S. E. Cleland, W. Steinhardt, L. M. Neas, J. Jason West, y A. G. Rappold, “Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas”, Environ. Int., vol. 178, ago. 2023, doi: 10.1016/j.envint.2023.108005.
9. X. Li, Y. Zhou, S. Yu, G. Jia, H. Li, y W. Li, “Urban heat island impacts on building energy consumption: a review of approaches and findings”, 2019.
10. M. Ballinas y V. L. Barradas, “The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model”, J. Environ. Qual., vol. 45, núm. 1, pp. 157–166, ene. 2016, doi: 10.2134/jeq2015.01.0056.
11. M. Sánchez-Hernández, M. Pérez-Suárez, J. R. V. Lazalde, T. T. Arteaga-Reyes, y J. E. Ramírez-Albores, “Spatio-temporal variation of the heat islands as a determinant of urban thermal comfort in the Metropolitan Area of Toluca Valley, Mexico”, Investigaciones Geograficas, núm. 85, pp. 57–76, ene. 2026, doi: 10.14198/INGEO.29684.
12. M. L. Colunga, H. Cambrón-Sandoval, H. Suzán-Azpiri, A. Guevara-Escobar, y H. Luna-Soria, “The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico”, 2015.
13. Casillas-Higuera, R. García-Cueto, O. Leyva-Camacho, y F. F. Gonzalez-Navarro, “Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, B.C., México”, Informacion Tecnologica, vol. 25, núm. 1, pp. 139–150, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000100015.

14. Contreras Cardosa, J. A. Salas, P. Mendoza, G. V. Angulo, y Q. Urías, “DETERMINACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANO EN CIUDAD JUAREZ MEDIANTE PROGRAMA DE CÓMPUTO”, 2008. En línea. Disponible en: http://www.juarez.gob.mx/
15. L. Mercado Maldonado, I. Marincic Lovriha, L. Encinas Rosales, y A. para correspondencia, “Morfología De Isla De Calor Urbana En Hermosillo, Sonora Y Su Aporte Hacia Una Ciudad Sustentable Morphology Of The Urban Heat Island Of Hermosillo, Sonora And The Contribution Towards A Sustainable City”, 2017. En línea. Disponible en: http://biotecnia.unison.mx
16. C. A. Fuentes Pérez, “Urban heat islands in Tampico, Mexico: Impact of microclimate on the habitat quality”, Nova scientia, vol. 7, pp. 495–515, 2015.
17. M. Zavaleta-Palacios, E. Díaz-Nigenda, W. Vázquez-Morales, H. Morales-Iglesias, y G. Narcizo de Lima, “Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas”, Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, vol. 7, núm. 2, oct. 2020, doi: 10.19136/era.a7n2.2485.
18. N. Vargas y M. F. R. Van Gort, “Changing Climate in the Metropolitan Zone of Xalapa, Veracruz: Natural and Anthropic Factors”, Investigaciones Geograficas, núm. 114, ago. 2024, doi: 10.14350/rig.60855.
19. U. Manzanilla Quiñones, “Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México”, Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, vol. 10, núm. 1, mar. 2023, doi: 10.19136/era.a10n1.3495.
20. Q. Weng, “Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends”, julio de 2009. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.
21. J. A. Voogt y T. R. Oke, “Thermal remote sensing of urban climates”, Remote Sens. Environ., vol. 86, núm. 3, pp. 370–384, ago. 2003, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
22. N. Aslan y D. Koc-San, “The use of land cover indices for rapid surface urban heat island detection from multi-temporal landsat imageries”, ISPRS Int. J. Geoinf., vol. 10, núm. 6, jun. 2021, doi: 10.3390/IJGI10060416.
23. U. Avdan and G. Jovanovska, “Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data,” J Sens, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/1480307.
24. T. Löfstedt, P. Brynolfsson, T. Asklund, T. Nyholm, and A. Garpebring, “Gray-level invariant Haralick texture features,” PLoS One, vol. 14, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0212110.
25. M. R. Ibrahim, J. Haworth, and T. Cheng, “Weathernet: Recognising weather and visual conditions from street-level images using deep residual learning,” ISPRS Int J Geoinf, vol. 8, no. 12, Nov. 2019, doi: 10.3390/ijgi8120549.
26. M. Reguiegue and F. Chouireb, “Automatic day time cloud detection over land and sea from MSG SEVIRI images using three features and two artificial intelligence approaches,” Signal Image Video Process, vol. 12, no. 1, pp. 189–196, Jan. 2018, doi: 10.1007/s11760-017-1145-0.
27. “Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024.” Accessed: Aug. 05, 2025. Online. Available: https://www.veracruz.gob.mx/finanzas/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/DR-Nautla2020.pdf
28. USGS, “Web page of USGS.” Online. Available: https://earthexplorer.usgs.gov

MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA DEMOSTRACION DE LA AERODINÁMICA BAJO EL PRINCIPIO DE BERNOULLI

Medina Salgado Rafael Alberto [1], Arciga Vargas Manuel [1], Chavarria Gil Heidy Adriana [1], Garcia Martinez Angeluz Fabiola [1], Lino Silva Estrella Zayani [1], Zarate Lemus Alexa Guadalupe [2], Hernández Mercado Valeria [2] y Yesenia Guadalupe Arroyo Zarate [2],

[1] Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero, [2] Colegio de Bachilleres Zihuatanejo.
r_medina@utcgg.edu.mx

RESUMEN

El presente proyecto describe el desarrollo de un modelo didáctico destinado a la visualización y análisis de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un conjunto alar, así como su relevancia en el ámbito de la aeronáutica y la enseñanza de la física. El prototipo se concibe como una herramienta experimental que permite comprender de manera tangible el comportamiento de los flujos de aire y su interacción con distintas geometrías, facilitando la interpretación de fenómenos aerodinámicos que, en muchos casos, resultan abstractos en el enfoque teórico tradicional.

El método empleado consistió en el diseño y construcción de un módulo experimental integrado por una máquina generadora de humo, un extractor de aire de tipo industrial, una cámara acrílica de observación y un sistema de distribución de humo estratégicamente orientado hacia los modelos alares. Esta configuración permitió canalizar el flujo de aire de manera controlada y hacer visible su trayectoria alrededor de las superficies analizadas. Adicionalmente, se incorporó un anemómetro para la medición de la velocidad del flujo, lo que posibilitó la obtención de datos cuantitativos y su correlación con las observaciones cualitativas del comportamiento aerodinámico.

Los resultados obtenidos en las primeras pruebas experimentales evidencian un comportamiento aerodinámico consistente con los principios teóricos esperados. A través de la visualización del humo fue posible identificar la aerodinámica activa de los perfiles alares y observar cómo la variación en las geometrías modifica el patrón del flujo de aire. Estas variaciones se reflejan tanto en la generación de sustentación como en la reducción o control de la velocidad del flujo, aspectos que pudieron ser analizados de forma comparativa mediante la medición de la velocidad del aire a distintas condiciones escaladas.

En conclusión, el prototipo desarrollado constituye una herramienta didáctica eficaz para la enseñanza de las fuerzas aerodinámicas, ya que permite al estudiante observar de manera directa la interacción entre los flujos de aire y las geometrías alares. Esta aproximación experimental favorece una comprensión más profunda de los fenómenos aerodinámicos, fortaleciendo el aprendizaje significativo al integrar teoría, observación visual y medición física en un mismo entorno educativo.

INTRODUCCIÓN

La aerodinámica representa uno de los fundamentos principales en el estudio de la física aplicada y la ingeniería aeronáutica, debido a que permite comprender la interacción entre los flujos de aire y las superficies alares. Sin embargo, muchos de estos fenómenos resultan abstractos dentro de la enseñanza tradicional. Por ello, se desarrolló un módulo didáctico experimental basado en el principio de Bernoulli, diseñado para visualizar de manera tangible el comportamiento del flujo de aire sobre distintos perfiles alares mediante humo y medición de velocidad. El sistema facilita la interpretación de fenómenos asociados con sustentación, presión y variación de velocidad del flujo, fortaleciendo el aprendizaje experimental en entornos educativos.

TEORÍA

El marco conceptual de este trabajo se fundamenta en la mecánica de fluidos y, específicamente, en el Principio de Bernoulli, el cual establece que para un flujo constante, en una línea de corriente de un fluido incompresible y sin fricción, la suma de la presión estática, la presión dinámica y la energía potencial por unidad de volumen se mantiene constante a lo largo de su trayectoria. Esto se expresa matemáticamente mediante la ecuación:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{constante}$$

Donde "**P"** representa la presión estática del fluido, "**ρ"**es la densidad, "**v"** corresponde a la velocidad del flujo, "**g"** es la aceleración de la gravedad y **"z"** es la altura geométrica. En perfiles alares asimétricos o con un ángulo de ataque determinado, las líneas de corriente se comprimen en la superficie superior (extradós), provocando un incremento de la velocidad "**v"**. De acuerdo con el principio enunciado, este aumento en la energía dinámica se traduce en una caída de la presión estática "**P"** en dicha zona, generando una diferencia de presiones respecto a la superficie inferior (intradós) que da origen a la fuerza de sustentación aerodinámica.



Imagen 1. Perfil alar sometido a pruebas aerodinámicas

RESULTADOS

El desarrollo del proyecto se ejecutó mediante un enfoque metodológico de diseño y manufactura experimental a cargo de una comisión multidisciplinaria de estudiantes y profesores de ambas instituciones participantes. El módulo experimental está constituido por los siguientes subsistemas integrados:

- **Cámara de Observación:** Construida en material acrílico transparente para permitir una visibilidad completa del fenómeno, equipada internamente con un sistema de iluminación LED para optimizar el contraste de las líneas de corriente.
- **Sistema de Inducción de Aire:** Se integró un extractor industrial acoplado a un potenciómetro de regulación de revoluciones por minuto (RPM). Este mecanismo permite controlar de forma precisa la velocidad del flujo de aire inducido dentro de la cámara.
- **Sistema de Trazado de Flujo:** Para hacer visible el campo de flujo, se incorporó un generador de humo conectado a un sistema de canalización prioritaria mediante una tubería flexible tipo ducto, orientando el trazador de manera directa hacia la sección de prueba.
- **Modelos Alares:** Se diseñó un conjunto de perfiles con geometrías alares intercambiables para propiciar el análisis comparativo del comportamiento aerodinámico, así como un modelo a escala de un avión f14.
- **Sistema de Registro Visual:** Se instaló un sistema de videograbación en vivo conectado a una pantalla externa para facilitar la observación detallada y el registro de los ensayos por parte de grupos de estudiantes en tiempo real.



Imagen 2. Prototipo terminado

Las pruebas experimentales permitieron visualizar de forma clara el comportamiento del flujo de aire sobre diferentes perfiles alares. Se identificaron variaciones en la trayectoria del humo asociadas con cambios geométricos de las superficies analizadas, evidenciando fenómenos relacionados con sustentación y variación de presión. Las mediciones realizadas mostraron diferencias en la velocidad del flujo, confirmando un comportamiento acorde con los principios teóricos de Bernoulli. El sistema demostró ser funcional para la observación comparativa de fenómenos aerodinámicos en un entorno educativo. Las evaluaciones experimentales demostraron de manera clara la viabilidad operativa del prototipo. Mediante la inyección de humo, se logró la visualización nítida de las líneas de corriente y sus trayectorias alrededor de las superficies alares.

- **Comportamiento Geométrico:** Se identificaron de forma cualitativa las variaciones en la trayectoria del humo en función de los cambios geométricos de los perfiles analizados, permitiendo evidenciar físicamente las zonas críticas asociadas con los fenómenos de sustentación y las diferencias de presión.



Imagen 3. Comportamiento del viento sobre el perfil alar

- **Validación Teórica:** Las mediciones instrumentales de velocidad del flujo registraron variaciones cuantitativas consistentes con las restricciones geométricas impuestas por las superficies alares. Estos datos confirmaron un comportamiento homólogo a las predicciones derivadas del Principio de Bernoulli y la conservación de la masa.

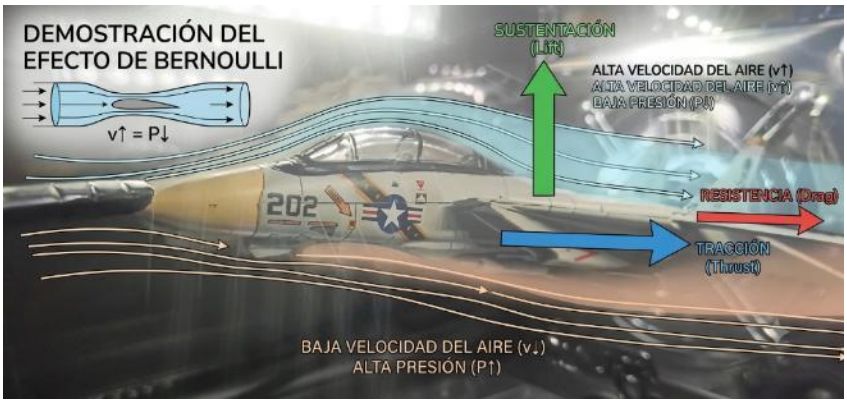


Imagen 4. Explicación del fenómeno (Efecto de Bernoulli)

- **Funcionalidad Didáctica:** El dispositivo demostró una alta estabilidad y reproducibilidad para la observación comparativa de fenómenos aerodinámicos dentro de un contexto áulico y de laboratorio.

CONCLUSIONES

El módulo desarrollado constituye una herramienta didáctica eficiente para la enseñanza de principios aerodinámicos y del efecto Bernoulli. La integración de observación visual y medición experimental favorece la comprensión de fenómenos complejos mediante una aproximación práctica e interactiva. Asimismo, el prototipo facilita el aprendizaje significativo al relacionar conceptos teóricos con evidencia experimental observable, fortaleciendo las competencias técnicas de los estudiantes en áreas de física e ingeniería aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Anderson, J. D. (2017). *Fundamentals of aerodynamics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
[2] Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
[3] Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2015). *Introduction to fluid mechanics* (9th ed.). Wiley.

ESTUDIO INTEGRAL DE LA SUBSIDENCIA EN VILLAS DEL PEDREGAL MORELIA, MICHOACÁN

Fátima Merino García[1], Víctor Manuel Hernández Madrigal[1], Francesca Cigna[2]

[1]Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, [2]CNR-ISAC Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Roma, Italia, 00133.
1512337x@umich.mx

RESUMEN

La subsidencia en Morelia ha sido documentada históricamente como un proceso asociado a fallas superficiales con control estructural (Garduño-Monroy et al., 2001). Sin embargo, en el fraccionamiento Villas del Pedregal, uno de los desarrollos habitacionales de interés social más extensos de México, se presenta un patrón distinto caracterizado por subsidencia activa en forma de cuenca sin manifestaciones visibles de fracturamiento superficial. Este desarrollo alberga una población superior a 30,000 habitantes, lo que lo convierte en uno de los sectores urbanos con mayor concentración poblacional de la ciudad. La elevada densidad de población e infraestructura asentada sobre una zona afectada por deformación activa hace necesario comprender los mecanismos responsables del fenómeno y sus posibles implicaciones urbanas.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar la evolución espacial y temporal de la subsidencia en Villas del Pedregal mediante la integración de técnicas InSAR, información geofísica y análisis espacial, con el fin de evaluar la distribución de la deformación del terreno, su relación con las condiciones del subsuelo y su impacto potencial sobre el entorno urbano.

Para ello, se analizaron series temporales InSAR derivadas de imágenes Sentinel-1 adquiridas entre 2014 y 2023 en órbitas ascendentes y descendentes, procesadas mediante la metodología P-SBAS. A partir de estos datos se estimaron las componentes vertical (VU) y horizontal este-oeste (VE) de la deformación, así como la distorsión angular asociada a subsidencia diferencial. De manera complementaria, se integró información geofísica proveniente de una Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y variables urbanas relacionadas con la población y las características constructivas de las viviendas.

Los resultados permitieron identificar un bowl de subsidencia activo con una extensión aproximada de 7.231 km² y velocidades máximas de hundimiento de hasta −7.37 cm/año. Las series temporales evidencian desplazamientos acumulados cercanos a 60 cm en la porción central del fraccionamiento durante el periodo analizado. La componente horizontal mostró desplazamientos relativamente bajos y convergentes hacia el centro del bowl, consistentes con procesos de compactación progresiva del subsuelo. El análisis temporal reveló que los mayores niveles de subsidencia ocurrieron entre 2014 y 2017, seguidos por una disminución gradual de las tasas de deformación en años recientes.

Los mayores valores de distorsión angular se localizaron en los bordes del bowl, particularmente en el sector sur del fraccionamiento, donde se concentra la deformación diferencial más intensa. La TRE permitió identificar una secuencia volcánico-sedimentaria compuesta por basaltos fracturados que sobreyacen depósitos finos saturados, además de una discontinuidad geofísica que coincide espacialmente con las zonas de mayor distorsión angular. Finalmente, el análisis espacial permitió identificar sectores con riesgo medio y alto asociados a subsidencia activa y susceptibilidad estructural derivada de deformación diferencial.

Los resultados evidencian que la subsidencia en Villas del Pedregal constituye un proceso activo asociado a la compactación diferencial del subsuelo, cuya distribución espacial está condicionada por la interacción entre las características geológicas locales y la explotación del agua subterránea. La integración de información InSAR, geofísica y herramientas SIG proporciona una metodología útil

para la evaluación del riesgo urbano en zonas afectadas por subsidencia en ambientes volcánico-sedimentarios.

INTRODUCCIÓN

La subsidencia es un proceso de deformación del terreno que se manifiesta como el descenso progresivo de la superficie terrestre debido a la compactación de materiales del subsuelo. Entre los mecanismos que favorecen su desarrollo, la extracción intensiva de agua subterránea constituye uno de los factores más ampliamente documentados, ya que modifica el estado de esfuerzos efectivos en materiales compresibles y favorece su consolidación progresiva (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Galloway y Burbey, 2011). Debido a su carácter acumulativo y frecuentemente irreversible, la subsidencia representa una problemática geológica relevante en zonas urbanas, donde puede afectar viviendas, vialidades, redes de servicios e infraestructura crítica.

A escala global, la subsidencia inducida por extracción de agua subterránea ha sido documentada en diversas cuencas sedimentarias y ambientes volcánico-sedimentarios. La magnitud y expresión superficial del fenómeno dependen de factores geológicos, hidrogeológicos y mecánicos, tales como la distribución de materiales compresibles, la geometría del sistema acuífero y la presencia de unidades con diferente comportamiento reológico (Chaussard et al., 2014; Gambolati y Teatini, 2015; Raspini et al., 2022). En particular, diversos estudios han demostrado que la subsidencia puede desarrollarse sin manifestaciones estructurales evidentes cuando materiales altamente deformables se encuentran cubiertos por unidades más competentes, capaces de redistribuir los esfuerzos generados por la compactación en profundidad (Chaussard et al., 2014; Aldaajani et al., 2022).

En México, la subsidencia urbana ha sido ampliamente documentada en ciudades asentadas sobre depósitos lacustres y secuencias volcánico-sedimentarias sujetas a una intensa explotación de agua subterránea. En estos contextos, la deformación puede manifestarse tanto como hundimientos continuos distribuidos en forma de cuenca, como mediante subsidencia diferencial asociada a fallamiento superficial y agrietamiento del terreno (Carreón-Freyre et al., 2016; Pacheco-Martínez et al., 2015; Cigna y Tapete, 2021). La diversidad de comportamientos observados evidencia la importancia de comprender los factores que controlan la distribución espacial y temporal de la deformación, así como sus posibles implicaciones para el entorno urbano.

En la ciudad de Morelia, la subsidencia ha sido asociada históricamente a sistemas de fallas geológicas enterradas que condicionan la localización de la deformación diferencial observada en superficie (Garduño-Monroy et al., 2001; Figueroa-Miranda et al., 2020). Sin embargo, investigaciones recientes han identificado un comportamiento distinto en el sector poniente de la ciudad, donde se desarrolla subsidencia activa sin evidencia de fallamiento superficial. Este patrón de deformación sugiere la existencia de mecanismos diferentes a los observados en otros sectores de Morelia y plantea interrogantes sobre la influencia de las condiciones geológicas e hidrogeológicas locales en la evolución del fenómeno.

Dentro de este sector se localiza el fraccionamiento Villas del Pedregal, uno de los desarrollos habitacionales de interés social más extensos del país. Desde el inicio de su urbanización en 2006, el crecimiento acelerado de la población y el incremento en la demanda de agua subterránea han modificado significativamente las condiciones del entorno. Debido a la elevada concentración de población e infraestructura asentada sobre una zona afectada por subsidencia activa, resulta fundamental comprender la evolución espacial y temporal de la deformación y evaluar sus posibles implicaciones para la vulnerabilidad urbana.

A pesar de la importancia del fenómeno, aún son limitados los estudios que integran información interferométrica, caracterización geofísica y análisis espacial para evaluar de manera conjunta la evolución de la subsidencia, los patrones de deformación diferencial y sus posibles consecuencias sobre la población y la infraestructura urbana. Asimismo, persisten incertidumbres respecto a los

factores que controlan este estilo particular de subsidencia sin manifestaciones estructurales superficiales.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la evolución espacial y temporal de la subsidencia en Villas del Pedregal mediante la integración de información derivada de técnicas InSAR, datos geofísicos y herramientas de análisis espacial. Particularmente, se busca identificar la distribución y magnitud de la deformación del terreno, evaluar los patrones de subsidencia diferencial asociados al fenómeno y analizar sus implicaciones en términos de vulnerabilidad y riesgo urbano. Los resultados contribuyen a una mejor comprensión de los procesos de subsidencia en ambientes volcánico-sedimentarios y aportan información relevante para la gestión del riesgo y la planificación territorial en zonas urbanas sujetas a deformación activa.

TEORÍA

Subsidencia

La subsidencia es un proceso de deformación del terreno que se manifiesta como el descenso progresivo de la superficie terrestre debido a la compactación de materiales del subsuelo. Entre los factores que favorecen su desarrollo, la extracción intensiva de agua subterránea constituye uno de los mecanismos más ampliamente documentados, ya que la disminución de la presión de poro incrementa el esfuerzo efectivo que soporta la matriz sedimentaria, favoreciendo la consolidación de materiales compresibles y el consecuente hundimiento de la superficie (Terzaghi, 1925; Galloway y Burbey, 2011).

En ambientes volcánico-sedimentarios, la subsidencia puede desarrollarse de formas distintas dependiendo de las características geológicas e hidrogeológicas locales. Diversos estudios han demostrado que la presencia de materiales finos altamente compresibles cubiertos por unidades volcánicas más competentes puede favorecer la ocurrencia de subsidencia continua sin la formación de fallas o fracturas visibles en superficie. En estos casos, el hundimiento suele manifestarse como una depresión de gran extensión espacial, comúnmente denominada *bowl* de subsidencia, donde los mayores desplazamientos verticales se concentran hacia la parte central de la zona afectada (Chaussard et al., 2014; Aldaajani et al., 2022). Este comportamiento ha sido documentado en diversas ciudades mexicanas afectadas por la sobreexplotación de acuíferos, incluyendo Morelia, donde investigaciones recientes han identificado subsidencia activa en sectores urbanos sin evidencia de fallamiento superficial (Cigna y Tapete, 2021; 2022).

Además de la magnitud total del hundimiento, resulta fundamental analizar la deformación diferencial del terreno, ya que los daños en la infraestructura suelen estar asociados a gradientes espaciales de deformación más que al hundimiento absoluto. Las diferencias de desplazamiento entre zonas cercanas pueden generar esfuerzos diferenciales capaces de afectar viviendas, vialidades y redes de servicios, incluso en ausencia de fallas superficiales visibles.

Monitoreo de subsidencia mediante InSAR

Durante las últimas décadas, la Interferometría Radar de Apertura Sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) se ha consolidado como una de las herramientas más eficaces para el monitoreo de deformaciones del terreno. Esta técnica permite detectar desplazamientos milimétricos mediante el análisis de la diferencia de fase registrada entre imágenes radar adquiridas en distintos momentos, generando mediciones continuas de deformación sobre amplias extensiones territoriales (Massonnet y Feigl, 1998; Crosetto et al., 2016). Su aplicación ha permitido caracterizar procesos de subsidencia asociados a la explotación de acuíferos en diversas regiones del mundo y particularmente en ciudades mexicanas afectadas por hundimientos diferenciales.

Las mediciones obtenidas mediante InSAR corresponden al desplazamiento proyectado sobre la línea de visión del satélite (*Line of Sight*, LOS), por lo que representan una combinación de

movimientos verticales y horizontales del terreno. Para interpretar adecuadamente los mecanismos de deformación, Cigna y Tapete (2021) propusieron una metodología basada en la combinación de observaciones adquiridas desde órbitas ascendentes y descendentes, permitiendo estimar la componente vertical de la deformación (VU) y la componente horizontal en dirección este-oeste (VE). La integración de ambas componentes proporciona una representación más completa del comportamiento del terreno y facilita la identificación de los procesos responsables del hundimiento.

Asimismo, la evaluación de la subsidencia diferencial puede realizarse mediante el cálculo de la distorsión angular (β), parámetro que relaciona la diferencia de desplazamiento vertical observada entre dos puntos con la distancia que los separa (Skempton y MacDonald, 1956). Este indicador permite identificar sectores donde los gradientes espaciales de deformación son más pronunciados y, por lo tanto, donde existe una mayor probabilidad de afectación a viviendas e infraestructura urbana (Cigna y Tapete, 2021).

Integración de información geofísica

La caracterización de los materiales presentes en el subsuelo constituye un elemento importante para la interpretación de los patrones de subsidencia observados en superficie. Entre las técnicas geofísicas más utilizadas para este propósito se encuentra la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), la cual permite identificar contrastes de resistividad asociados a cambios litológicos y estimar la distribución espacial de materiales con diferentes propiedades físicas.

Aunque la subsidencia es un fenómeno que se manifiesta en superficie, la incorporación de información geofísica proporciona evidencia indirecta sobre las condiciones del subsuelo que pueden favorecer la deformación observada. La integración de resultados InSAR con datos de resistividad eléctrica permite fortalecer la interpretación de los mecanismos involucrados en el desarrollo de la subsidencia y evaluar la posible influencia de la variabilidad litológica en la distribución espacial de los hundimientos

PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudio

El área de estudio corresponde al fraccionamiento Villas del Pedregal, localizado en el sector poniente de la ciudad de Morelia, Michoacán, México (Figura 1). Este desarrollo habitacional inició su construcción en 2006 y actualmente constituye uno de los complejos residenciales de interés social más extensos del municipio. Entre 2010 y 2020 la población experimentó un crecimiento del 91% (INEGI, 2011; INEGI,2020), acompañado por una expansión urbana significativa y un incremento sostenido en la demanda de agua subterránea.

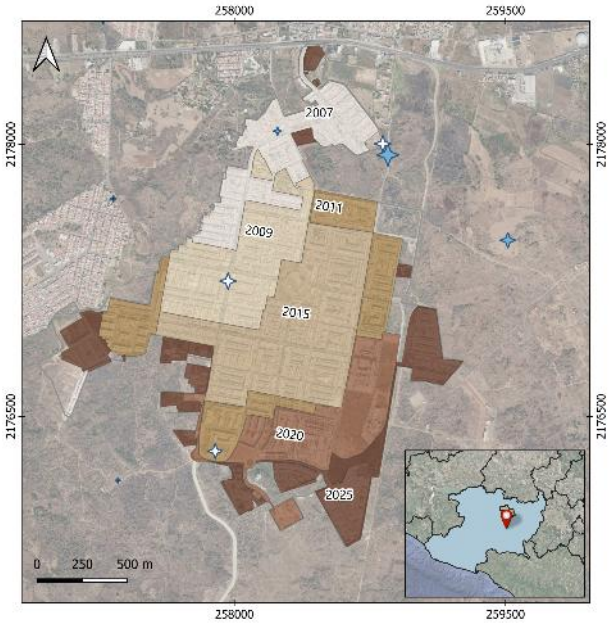


Figura 5: Localización de Villas del Pedregal con información referente a ubicación de pozos de extracción de agua, crecimiento urbano por años y ubicación del perfil TRE.

Desde el punto de vista geológico, la zona se encuentra sobre una secuencia volcánico-sedimentaria conformada por flujos de lava basáltica que sobreyacen materiales volcaniclásticos y depósitos sedimentarios de origen lacustre con diferentes grados de consolidación. Estudios previos han documentado subsidencia activa en esta región sin evidencia de fallamiento superficial, convirtiéndola en un sitio de interés para el análisis de procesos de deformación asociados a la compactación del subsuelo (Avellán et al., 2020; Cigna y Tapete; 2021).

Procesamiento multitemporal InSAR

La caracterización de la subsidencia se realizó mediante imágenes Sentinel-1 adquiridas entre 2014 y 2023 en órbitas ascendentes y descendentes. Los datos fueron procesados mediante la metodología Parallel Small Baseline Subset (P-SBAS), desarrollada por el Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IREA) e implementada en la plataforma EarthConsole (Casu et al., 2014; Manunta et al., 2019).

El procesamiento se basó en la metodología propuesta por Cigna y Tapete (2021) para el análisis de subsidencia urbana mediante series temporales InSAR. A partir de este procedimiento se obtuvieron mapas de velocidad media, deformación acumulada y series temporales de desplazamiento en dirección Line of Sight (LOS), permitiendo caracterizar la evolución espacial y temporal de la subsidencia en Villas del Pedregal.

Debido a que los puntos coherentes obtenidos en órbitas ascendentes y descendentes presentan distribuciones espaciales diferentes, ambas geometrías fueron integradas en un grid espacial común mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), generando una representación homogénea de la deformación para toda el área de estudio.

Descomposición de componentes de deformación y análisis temporal

Con el objetivo de obtener una representación más completa del movimiento del terreno, se aplicó la metodología de descomposición propuesta por Cigna y Tapete (2021), la cual combina

observaciones ascendentes y descendentes para estimar la componente vertical de deformación (VU) y la componente horizontal este-oeste (VE).

La componente vertical fue calculada mediante:

$$(1)\ \ V_U = \frac{U_{Asc} * V_{Desc} - E_{Asc} * V_{Desc}}{E_{Desc} * U_{Asc} - E_{Asc} U_{Desc}}$$

La componente horizontal este-oeste se estimó mediante:

$$(2)\ V_E = \frac{U_{Asc} * V_{Desc} - U_{Desc} * V_{Asc}}{E_{Desc} * U_{Asc} - E_{Asc} U_{Desc}}$$

Donde V_{Asc} y V_{desc} corresponden a las velocidades LOS obtenidas en órbitas ascendente y descendente, respectivamente, mientras que E y U representan los cosenos direccionales asociados a la geometría de observación del radar.

Los mapas resultantes permitieron caracterizar la magnitud, distribución espacial y geometría del bowl de subsidencia presente en el área de estudio. Asimismo, se generaron mapas anuales de deformación vertical para el periodo 2014–2023 con el fin de analizar la evolución temporal del fenómeno e identificar los años con mayores tasas de subsidencia.

Adicionalmente, se analizaron series temporales de desplazamiento acumulado en puntos representativos y se aplicaron ajustes polinómicos de segundo orden para identificar tendencias de aceleración o desaceleración de la deformación. Con base en los mapas anuales de subsidencia vertical también se estimaron cambios volumétricos asociados a la evolución del bowl de subsidencia.

Distorsión angular, vulnerabilidad y riesgo urbano

La deformación diferencial fue evaluada mediante el cálculo de la distorsión angular (β), parámetro geotécnico utilizado para identificar gradientes espaciales de deformación asociados a potenciales afectaciones estructurales. La distorsión angular fue calculada mediante:

$$(3)\ \ \beta = \frac{\Delta V_U}{L}$$

donde ΔV_U corresponde a la diferencia de subsidencia vertical entre dos puntos y L representa la distancia horizontal que los separa.

A partir de los mapas de subsidencia vertical se generaron mapas anuales de distorsión angular para analizar la evolución espacio-temporal de los asentamientos diferenciales. Posteriormente, se realizó un análisis a nivel de manzana urbana mediante la integración de información InSAR y herramientas SIG, calculando parámetros estadísticos de deformación para cada unidad espacial.

Finalmente, se integraron variables de subsidencia, deformación diferencial y exposición poblacional con el propósito de identificar sectores con mayores niveles de vulnerabilidad y riesgo potencial dentro del fraccionamiento.

Caracterización geofísica mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica

Con el objetivo de complementar la interpretación de los patrones de subsidencia observados en superficie, se realizó un perfil de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) dentro del área de

estudio. Los datos fueron procesados mediante algoritmos de inversión bidimensional para obtener la distribución de resistividades del subsuelo.

La interpretación geofísica permitió identificar contrastes asociados a materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, proporcionando información complementaria sobre las condiciones litológicas presentes en profundidad. La integración de estos resultados con la información InSAR permitió evaluar la posible relación entre la distribución espacial de la subsidencia y la heterogeneidad del subsuelo.

La metodología empleada se fundamenta en procedimientos previamente desarrollados y validados para el análisis de subsidencia urbana mediante datos Sentinel-1 y técnicas MT-InSAR (Cigna y Tapete, 2021), complementados con información geofísica y herramientas de análisis espacial para la evaluación de deformación diferencial y vulnerabilidad urbana.

RESULTADOS

Distribución espacial de la subsidencia

El análisis de la componente vertical de deformación (VU) permitió delimitar un bowl de subsidencia activo centrado en el fraccionamiento Villas del Pedregal (Figura 2). Las máximas velocidades de hundimiento alcanzan −7.37 cm/año y se concentran en la zona central del área de estudio. A partir de este núcleo, las velocidades disminuyen hacia los bordes del bowl, aunque con un comportamiento asimétrico: mientras que hacia el sector norte la transición es gradual, hacia el sur ocurre de manera más abrupta, reflejando cambios espaciales más pronunciados en la deformación del terreno.

La delimitación espacial del fenómeno permitió estimar una superficie afectada de aproximadamente 7.231 km², evidenciando que la subsidencia rebasa los límites del fraccionamiento y constituye un proceso de carácter regional. La distribución de velocidades define una depresión de geometría tipo bowl, característica de procesos de compactación asociados a la extracción de agua subterránea.

Con el fin de analizar la geometría de la deformación, se construyó un perfil norte-sur (A–A'). Los resultados muestran una depresión bien definida, donde las mayores velocidades de subsidencia se concentran en la porción central del perfil, mientras que los flancos norte y sur presentan gradientes espaciales de deformación más pronunciados.

Las series temporales de desplazamiento acumulado obtenidas para puntos representativos ubicados al norte (N), centro (C) y sur (S) del fraccionamiento evidencian un comportamiento espacialmente diferenciado dentro del bowl de subsidencia. El punto localizado en la zona central registra los mayores desplazamientos acumulados durante el periodo 2014–2023, alcanzando valores cercanos a 60 cm, mientras que los puntos ubicados hacia los sectores norte y sur presentan deformaciones significativamente menores.

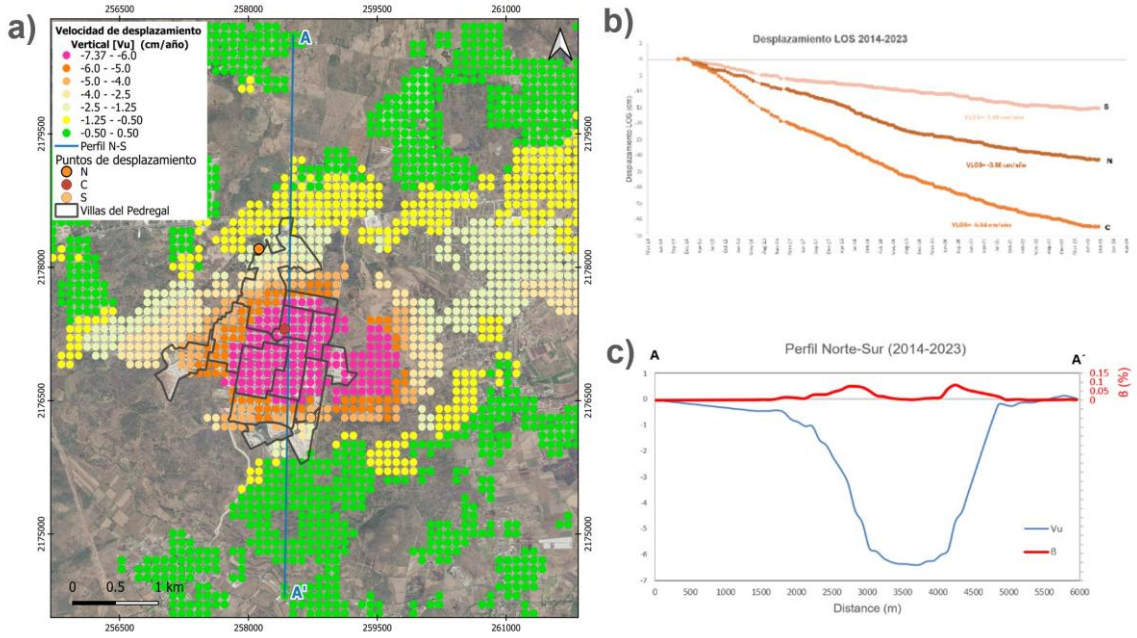


Figura 6: Deformación vertical (VU) en Villas del Pedregal durante el periodo 2014–2023. a) Mapa de velocidades de subsidencia vertical que muestra la delimitación del bowl de subsidencia; b) series temporales de desplazamiento acumulado para tres puntos representativos localizados en los sectores norte (N), centro (C) y sur (S) del fraccionamiento; y c) perfil norte–sur (A–A′) que ilustra la geometría y profundidad relativa del bowl de subsidencia.

Componente horizontal de deformación (VE)

La descomposición de las velocidades LOS permitió estimar la componente horizontal este-oeste de la deformación (VE) para el periodo 2014–2023 (Figura 3). Los resultados muestran desplazamientos horizontales relativamente bajos en comparación con la componente vertical, con magnitudes que alcanzan valores de hasta ±1.5 cm/año.

La distribución espacial de VE evidencia un patrón de convergencia hacia la zona central del bowl de subsidencia. En el sector occidental predominan desplazamientos dirigidos hacia el este, mientras que en el sector oriental se observan desplazamientos orientados hacia el oeste. Este comportamiento sugiere movimientos horizontales asociados a la compactación progresiva del subsuelo y al hundimiento diferencial observado en la componente vertical.

La coincidencia espacial entre las mayores magnitudes de VE y las zonas con mayores tasas de subsidencia refuerza la interpretación de que la deformación observada responde a un proceso activo de consolidación del subsuelo inducido por la extracción de agua subterránea.

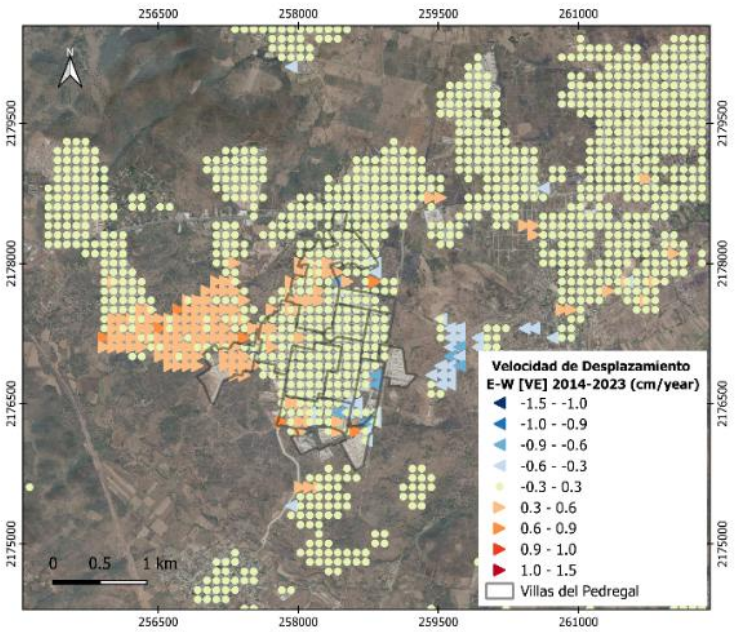


Figura 7: Distribución de la componente horizontal este-oeste (VE). Los valores negativos representan desplazamientos dirigidos hacia el oeste, mientras que los valores positivos indican movimientos hacia el este.

Distorsión angular (β)

La evaluación de la distorsión angular (β) permitió identificar los sectores con mayores gradientes espaciales de deformación dentro del área de estudio (Figura 4). Los valores más elevados se localizan principalmente en los bordes del bowl de subsidencia, donde las velocidades de hundimiento presentan cambios más abruptos. Destaca particularmente el sector sur del fraccionamiento, donde se concentran los máximos valores de distorsión angular, indicando una deformación diferencial más intensa.

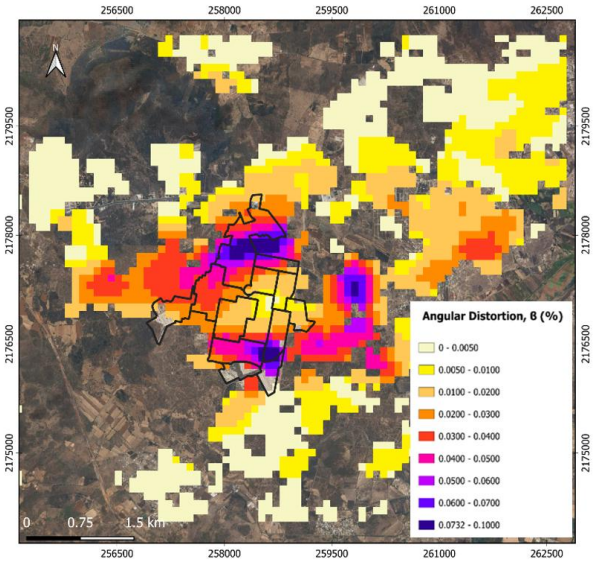


Figura 8: Distribución espacial de la distorsión angular (β) calculada a partir de la componente vertical de deformación (VU) para el periodo 2014–2023. Los mayores valores se concentran dentro del bowl de subsidencia.

En contraste, la porción central del bowl, aunque registra las mayores tasas de subsidencia vertical, presenta valores relativamente menores de distorsión angular debido a que el hundimiento ocurre de manera más homogénea. Este comportamiento evidencia que el potencial de afectación a la infraestructura no depende únicamente de la magnitud de la subsidencia, sino también de la variación espacial de la deformación.

La concentración de los mayores gradientes de deformación en el sector sur sugiere la presencia de factores locales que favorecen cambios bruscos en el comportamiento del terreno. Esta distribución espacial será posteriormente analizada en conjunto con la información geofísica del subsuelo para evaluar su posible relación con estructuras o contrastes litológicos identificados mediante Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Evolución temporal de la subsidencia

El análisis anual de la componente vertical de deformación (VU) permitió evaluar la evolución espacio-temporal de la subsidencia en Villas del Pedregal durante el periodo 2014–2023 (Figura 5). Los resultados muestran que la subsidencia no permaneció constante a lo largo del tiempo, sino que presentó variaciones significativas tanto en magnitud como en extensión espacial.

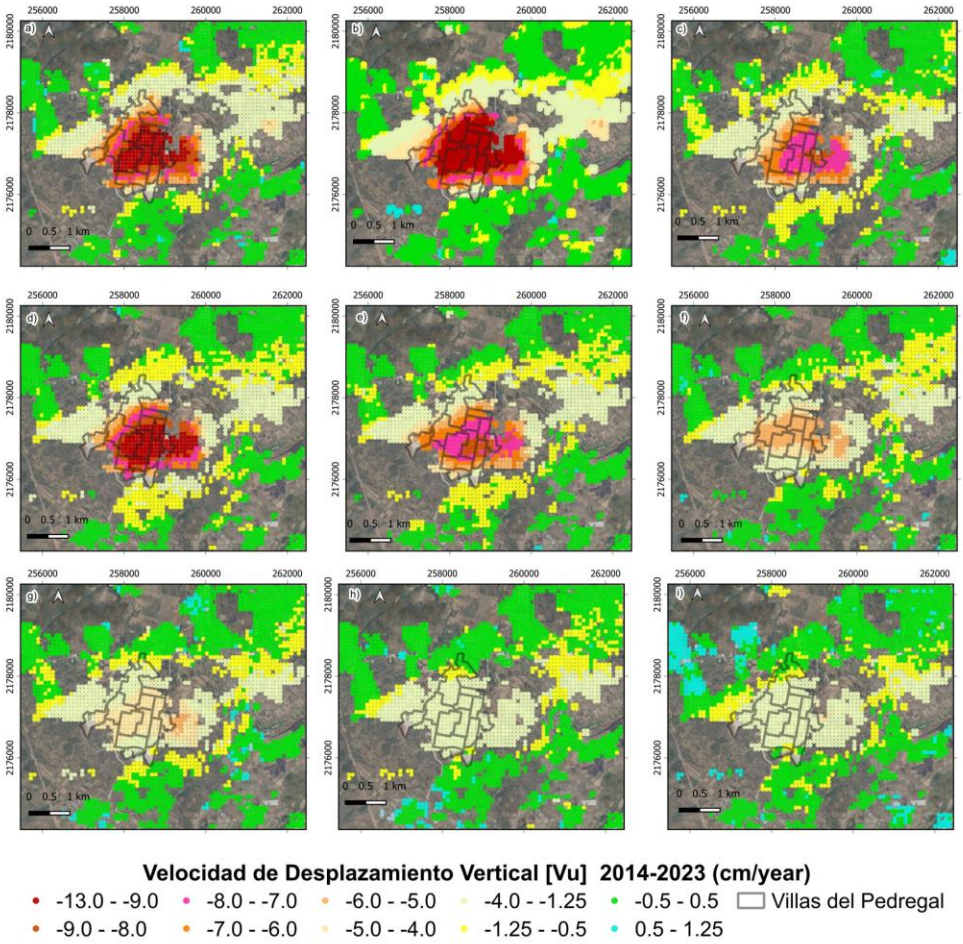


Figura 9: Evolución espacio-temporal de la componente vertical de deformación (VU) durante el periodo 2014-2023. Los mapas muestran la variación anual de las velocidades de subsidencia, evidenciando una reducción progresiva en la magnitud de subsidencia a lo largo del periodo de estudio.

Los mayores valores de subsidencia se registraron durante los años 2014, 2015 y 2017, cuando las velocidades de hundimiento alcanzaron valores superiores a −9 cm/año y el bowl de subsidencia presentó su máxima extensión. Durante este periodo, la deformación se concentró principalmente en la porción central del fraccionamiento, donde se localizan las mayores tasas de hundimiento observadas en todo el periodo de estudio.

A partir de 2018 se observa una disminución gradual en la magnitud de las velocidades de subsidencia y una reducción progresiva de la extensión del bowl. Esta tendencia se acentúa durante los años 2021 a 2023, cuando predominan valores cercanos a la estabilidad, aunque persisten sectores localizados con subsidencia residual.

La evolución observada sugiere una desaceleración progresiva del proceso de hundimiento a lo largo de la última década. Sin embargo, la persistencia de deformación en zonas específicas del fraccionamiento indica que la subsidencia continúa activa, aunque con menores tasas de deformación respecto a los primeros años analizados.

Caracterización geofísica del subsuelo

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) permitió identificar cuatro unidades geoeléctricas principales en el subsuelo del área de estudio (Figura 6). La unidad más profunda (U1) presenta valores bajos de resistividad y fue interpretada como limos saturados, mientras que la unidad U2 corresponde a un basalto fracturado. Sobre estas unidades se desarrolla una secuencia de materiales de mayor resistividad asociada a basaltos más competentes (U3) y una capa superficial de basalto fracturado y parcialmente saturado (U4).

La distribución de resistividades evidencia un contraste marcado entre los materiales sedimentarios profundos y las unidades volcánicas suprayacentes, configurando una secuencia volcánico-sedimentaria consistente con el modelo geológico propuesto para el sector poniente de Morelia. La presencia de materiales finos saturados en profundidad constituye una condición favorable para procesos de compactación asociados a la extracción de agua subterránea.

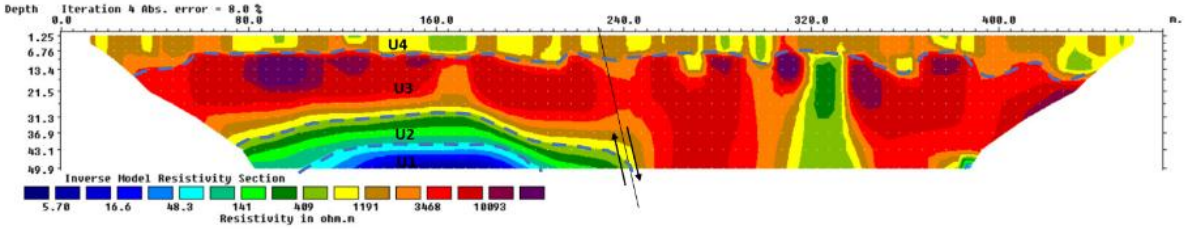


Figura 10: Perfil geoeléctrico obtenido mediante TRE e interpretación de unidades litológicas del subsuelo en Villas del Pedregal. Los resultados muestran la presencia de sedimentos finos saturados en profundidad (U1) sobre los cuales se desarrollan unidades volcánicas de diferente grado de fracturamiento (U2–U4).

Adicionalmente, el perfil muestra una discontinuidad geofísica en el sector sur, interpretada como una posible estructura tectónica o zona de fracturamiento. Resulta particularmente relevante que esta discontinuidad coincide espacialmente con los sectores donde se registran los mayores valores de distorsión angular, sugiriendo una posible influencia de las condiciones estructurales del subsuelo en la distribución de la deformación diferencial observada en superficie.

Vulnerabilidad y riesgo urbano

Con el propósito de evaluar las posibles implicaciones de la subsidencia sobre la población, se integraron los resultados de deformación vertical (VU) con información urbana a nivel de manzana. Los resultados muestran que la mayor parte del fraccionamiento se encuentra en categorías de riesgo medio y alto asociadas a subsidencia activa (Figura 7).

Las zonas clasificadas con riesgo alto se concentran principalmente en la porción central del fraccionamiento, coincidiendo espacialmente con el núcleo del bowl de subsidencia donde se registran las mayores velocidades de hundimiento. En contraste, las categorías de riesgo bajo se localizan predominantemente hacia el sector norte, donde las tasas de deformación son menores.

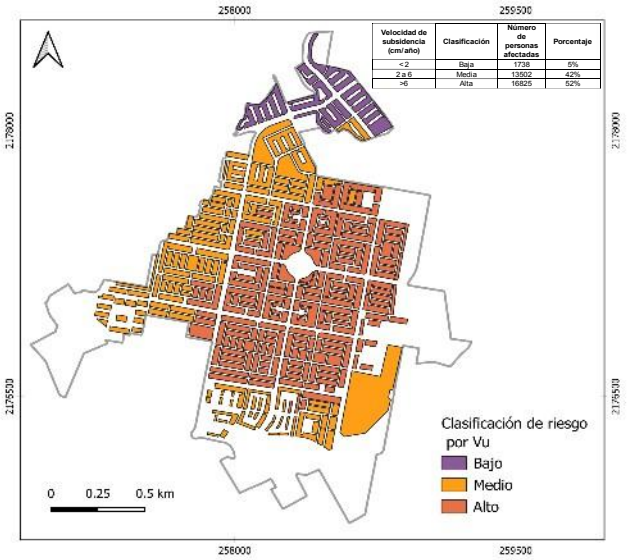


Figura 11: Clasificación del riesgo urbano asociado a la subsidencia en Villas del Pedregal, mediante la integración de la velocidad de subsidencia vertical (VU) y la densidad poblacional a nivel de manzana.

Susceptibilidad estructural asociada a deformación diferencial

Con el fin de evaluar la susceptibilidad estructural de las viviendas frente a la deformación diferencial, se integraron los resultados de distorsión angular con información sobre el número de pisos de las edificaciones, donde las categorías representan el grado potencial de afectación estructural asociado a los procesos de subsidencia y asentamientos diferenciales. (Figura 8).

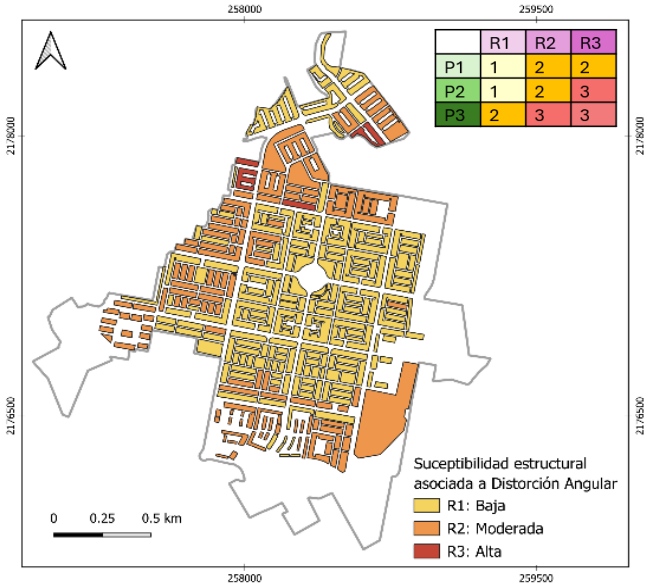


Figura 12: Susceptibilidad estructural de las viviendas ante deformación diferencial, obtenida mediante la integración de la distorsión angular (β) y el número de niveles por vivienda.

Los resultados muestran una distribución heterogénea de la susceptibilidad dentro del fraccionamiento, predominando las categorías baja y moderada en la mayor parte del área urbanizada.

Las zonas clasificadas con susceptibilidad alta se concentran principalmente en sectores localizados hacia el centro y sur del fraccionamiento, donde coinciden valores elevados de distorsión angular y edificaciones potencialmente más vulnerables a deformaciones diferenciales. En contraste, las categorías de susceptibilidad baja predominan en áreas donde los gradientes de deformación son menores.

La distribución espacial observada evidencia que la afectación potencial a las viviendas no depende únicamente de la magnitud del hundimiento, sino también de la variación espacial de la deformación y de las características constructivas de las edificaciones. Estos resultados permiten identificar sectores prioritarios para el monitoreo y la gestión del riesgo urbano asociado a la subsidencia.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante el análisis multitemporal InSAR permitieron identificar un bowl de subsidencia activo centrado en el fraccionamiento Villas del Pedregal, con velocidades máximas de hundimiento de hasta −7.37 cm/año y una superficie afectada aproximada de 7.231 km², evidenciando que el fenómeno rebasa los límites del desarrollo urbano y constituye un proceso de carácter regional.

La evolución temporal de la deformación mostró que la subsidencia ha permanecido activa durante todo el periodo 2014–2023, aunque con una tendencia general de disminución en su magnitud y extensión espacial a partir de 2018. Sin embargo, la persistencia de deformación residual confirma que el proceso continúa activo y representa un factor de riesgo para el entorno urbano.

La descomposición de las velocidades LOS reveló que la deformación está dominada por el componente vertical, mientras que la componente horizontal presenta un patrón convergente hacia el centro del bowl. Este comportamiento es consistente con procesos de compactación progresiva del subsuelo asociados a la extracción de agua subterránea.

El análisis de distorsión angular permitió identificar los mayores gradientes de deformación en los bordes del bowl, particularmente en el sector sur del fraccionamiento, indicando que las zonas con mayor potencial de afectación a la infraestructura están controladas principalmente por la deformación diferencial y no únicamente por la magnitud del hundimiento. La coincidencia espacial entre estos sectores y una discontinuidad identificada en la Tomografía de Resistividad Eléctrica sugiere una posible influencia de las condiciones estructurales del subsuelo en la distribución de la deformación observada.

Finalmente, la integración de información InSAR, geofísica y análisis espacial permitió identificar sectores con distintos niveles de riesgo y susceptibilidad estructural dentro del fraccionamiento. Los resultados demuestran el potencial de los enfoques multidisciplinarios para la evaluación de subsidencia en ambientes volcánico-sedimentarios y proporcionan información útil para la gestión del riesgo y la planificación territorial en zonas urbanas sujetas a deformación activa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aldaajani, T., Darwish, N., Wdowinski, S., Khan, S. D., & Alshammari, M. (2022). Land subsidence in arid urban environments induced by groundwater withdrawal and geological controls. Remote Sensing, 14(3), 1–20.
2. Avellán, D. R., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, I., & Pérez-López, R. (2020). Structural and volcanic controls on the evolution of the Morelia–Cuitzeo tectonic depression, central

Mexico. Journal of South American Earth Sciences, 102, 102646. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102646
3. Ávila-Olivera, J. A., & Garduño-Monroy, V. H. (2006). Subsidencia y agrietamiento del terreno asociados a la sobreexplotación de acuíferos en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23(3), 293–304.
4. Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Hernández-Marín, M., & Solís-Pichardo, G. (2016). Land subsidence and ground failure associated with groundwater exploitation in the Querétaro Valley, México. Engineering Geology, 219, 42–55.
5. Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. Remote Sensing of Environment, 140, 94–106. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.038
6. Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of Mexico City and Morelia land subsidence using Sentinel-1 data. Remote Sensing, 13(18), 1–27.
7. Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Spatio-temporal evolution of land subsidence in Morelia, Mexico, from Sentinel-1 InSAR observations. Remote Sensing, 14.
8. Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
9. Figueroa-Miranda, S., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, I., & Hernández-Madrigal, V. M. (2020). Ground deformation associated with active faults and groundwater extraction in Morelia, Mexico. Natural Hazards, 104(3), 2467–2489.
10. Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeology Journal, 19(8), 1459–1486. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5
11. Gambolati, G., & Teatini, P. (2015). Geomechanics of subsurface water withdrawal and induced land subsidence. Journal of Geodynamics, 91, 1–15.
12. Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., & Rodríguez-Torres, G. M. (2001). “Efectos de las fallas asociadas a la sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México”. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(1), 37-54.
13. Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., & Rodríguez-Torres, G. M. (2001). Efectos de las fallas asociadas a la sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(1), 37–54.
14. INEGI. (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. Microdatos. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/
15. INEGI. (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. Microdatos. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/
16. Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth’s surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441–500.
17. Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., & Ortiz-Lozano, J. A. (2015). Land subsidence and ground failure associated with groundwater exploitation in Aguascalientes, Mexico. Engineering Geology, 193, 172–183.
18. Raspini, F., Bianchini, S., Solari, L., Del Soldato, M., & Casagli, N. (2022). Satellite InSAR applications for monitoring land subsidence: Recent advances and future perspectives. Remote Sensing.
19. Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 5(5), 727–768.
20. Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics. Engineering News-Record, 95, 742–746.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT EQUILIBRISTA SOBRE UNA ESFERA CONTROLADO POR UN REGULADOR LINEAL CUADRÁTICO

Brandon Alvarado Santana, Yahaira Daniela Vázquez Martín, Roberto Rafael Rivera Durón y Juan Onofre Orozco López.

Centro Universitario de los Lagos
brandon.alvarado9084@alumnos.udg.mx.

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño, modelado e implementación de un prototipo de robot móvil que se equilibra sobre una esfera, así como el desarrollo de un controlador lineal cuadrático (LQR) para su estabilización. Este tipo de sistemas representa un problema clásico de control multivariable e inestable, lo que los convierte en plataformas ideales para la enseñanza y validación de estrategias avanzadas de control. En este contexto, el objetivo principal de la propuesta es doble: por un lado, demostrar la viabilidad de estabilizar un sistema intrínsecamente inestable mediante técnicas óptimas de control, y por otro, desarrollar una plataforma educativa replicable, basada en componentes de bajo costo y fácil acceso, con el fin de poder probar y desarrollar diversas técnicas de control avanzado. El diseño del prototipo se realizó considerando criterios de modularidad, accesibilidad y facilidad de reproducción. La estructura mecánica fue fabricada mediante técnicas de impresión 3D, lo que permite su rápida construcción y adaptación. El sistema de actuadores está basado en motores a pasos, seleccionados por su disponibilidad comercial y precisión de posicionamiento. Asimismo, se integraron sensores inerciales para la medición de la orientación del sistema. El modelado dinámico del robot se llevó a cabo mediante la formulación de Euler–Lagrange, lo que permitió derivar un modelo no lineal del sistema. Posteriormente, este modelo fue linealizado alrededor del punto de equilibrio para obtener una representación en espacio de estados adecuada para el diseño del controlador. Con base en el modelo lineal obtenido, se diseñó un controlador LQR que minimiza una función de costo cuadrática, balanceando el desempeño del sistema y el esfuerzo de control. La selección de las matrices de ponderación se realizó de manera iterativa para lograr un compromiso adecuado entre estabilidad y respuesta dinámica. La validación del controlador se llevó a cabo mediante simulaciones numéricas en MATLAB, donde se evaluó la respuesta del sistema ante diferentes condiciones iniciales y comportamiento ante perturbaciones externas. Los resultados de simulación muestran que el controlador LQR es capaz de estabilizar el sistema de manera efectiva, manteniendo el equilibrio del robot sobre la esfera incluso ante perturbaciones moderadas. Se observó una respuesta rápida y con oscilaciones amortiguadas, lo que evidencia un desempeño robusto del controlador diseñado. Adicionalmente, la implementación física del prototipo permitió corroborar la factibilidad del diseño propuesto, destacando la integración adecuada entre hardware y software. En conclusión, este trabajo demuestra que es posible desarrollar una plataforma experimental de bajo costo para la enseñanza de control multivariable, capaz de ilustrar conceptos complejos como la estabilización de sistemas inestables y el diseño de controladores óptimos. La combinación de modelado analítico, simulación y validación experimental refuerza el valor de la propuesta tanto en el ámbito educativo como en el desarrollo de prototipos mecatrónicos. Como trabajo futuro, se plantea la implementación de estrategias de control no lineal y el uso de técnicas de estimación de estado para mejorar el desempeño del sistema bajo condiciones más exigentes y como plataforma de prueba para nuevas técnicas de control de múltiple entrada y múltiple salida.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la robótica móvil ha experimentado un crecimiento significativo impulsado por la necesidad de desarrollar plataformas con mayor maniobrabilidad, eficiencia energética y capacidad de interacción en entornos dinámicos. Dentro de este contexto, los robots que se equilibran sobre una esfera, conocidos como ballbots, han surgido como una alternativa atractiva a las plataformas móviles convencionales debido a su capacidad de desplazamiento omnidireccional

continuo, permitiéndoles moverse en cualquier dirección sin requerir cambios previos de orientación. Esta característica les proporciona una elevada maniobrabilidad y los convierte en candidatos potenciales para aplicaciones de asistencia personal, interacción humano-robot, navegación en espacios reducidos y plataformas de investigación en control avanzado.

Uno de los primeros desarrollos relevantes de esta tecnología fue presentado por Lauwers, Kantor y Hollis, quienes desarrollaron un robot dinámicamente estable capaz de equilibrarse sobre una esfera mediante un mecanismo de accionamiento basado en ruedas de fricción y una arquitectura de control jerárquica. Dicho trabajo demostró la viabilidad práctica de este tipo de plataformas y estableció las bases para investigaciones posteriores enfocadas en mejorar su estabilidad, capacidad de maniobra y desempeño dinámico (Lauwers et al., 2006). Posteriormente, diversos investigadores exploraron alternativas de diseño mecánico y estrategias de control, incluyendo controladores proporcionales-derivativos, reguladores lineales cuadráticos y técnicas de seguimiento de trayectorias, obteniendo mejoras significativas en velocidad de respuesta y precisión de posicionamiento (Kumagai & Ochiai, 2010; Fankhauser & Gwerder, 2010).

Desde el punto de vista del control automático, los ballbots pertenecen a la categoría de sistemas mecánicos subactuados e intrínsecamente inestables. Estos sistemas poseen menos actuadores que grados de libertad, por lo que el mantenimiento del equilibrio requiere una acción de control continua y precisa. Debido a estas características, comparten propiedades dinámicas con problemas clásicos como el péndulo invertido y los vehículos autoequilibrados, siendo ampliamente utilizados como plataformas experimentales para la validación de técnicas de control lineal y no lineal (Spong, 1998; Fantoni & Lozano, 2002).

La complejidad dinámica de los ballbots ha motivado el desarrollo de múltiples estrategias de control. Entre ellas destacan los controladores basados en realimentación de estados, control óptimo, control robusto, modos deslizantes y control predictivo basado en modelo. Sin embargo, debido a su simplicidad de implementación, estabilidad garantizada y capacidad para optimizar simultáneamente el desempeño dinámico y el esfuerzo de control, el Regulador Lineal Cuadrático (LQR) continúa siendo una de las técnicas más empleadas para la estabilización de este tipo de sistemas (Levine, 2011; Gu et al., 2014).

Además de su relevancia científica, los ballbots constituyen plataformas educativas particularmente valiosas para la enseñanza de control moderno. Su comportamiento altamente inestable permite ilustrar conceptos fundamentales relacionados con modelado dinámico, representación en espacio de estados, análisis de estabilidad, observabilidad, controlabilidad y diseño de controladores multivariables. Sin embargo, muchas de las plataformas reportadas en la literatura requieren componentes especializados o presentan costos elevados, lo que limita su utilización en laboratorios docentes y centros de formación.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño, modelado y construcción de un robot equilibrado sobre una esfera de bajo costo, empleando componentes de fácil acceso y técnicas de fabricación aditiva mediante impresión 3D. A partir del modelo dinámico obtenido mediante la formulación de Euler-Lagrange, se desarrolla un controlador óptimo LQR para estabilizar el sistema alrededor de su punto de equilibrio. La efectividad de la estrategia propuesta se evalúa mediante simulaciones numéricas bajo diferentes condiciones iniciales y perturbaciones externas, demostrando la capacidad del controlador para mantener la estabilidad del sistema. Asimismo, el desarrollo realizado busca proporcionar una plataforma experimental accesible que pueda emplearse tanto en actividades de enseñanza como en futuras investigaciones relacionadas con sistemas de control multivariable y robótica móvil.

El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección de Teoría se presenta el modelado dinámico del robot equilibrado sobre una esfera mediante la formulación de Euler-Lagrange, obteniéndose el modelo no lineal y su posterior linealización alrededor del punto de equilibrio. Asimismo, se describe la representación en espacio de estados y los fundamentos del Regulador Lineal Cuadrático (LQR) empleado para la estabilización del sistema. En la sección de

Parte Experimental se detallan las características del prototipo desarrollado, incluyendo su diseño mecánico, sistema de actuación, instrumentación y los parámetros utilizados para la implementación del controlador. Posteriormente, en la sección de Resultados se analizan las respuestas obtenidas mediante simulaciones numéricas bajo diferentes condiciones de operación y perturbaciones externas, evaluando el desempeño del controlador propuesto. Finalmente, en la sección de Conclusiones se resumen los principales hallazgos del trabajo y se plantean posibles líneas de investigación y desarrollo futuro.

TEORÍA

El ballbot se modela descomponiendo su movimiento en dos planos verticales ($\boldsymbol{yz, xz}$) y un plano horizontal ($\boldsymbol{xy}$, correspondiente a la rotación de guiñada) como se muestra en la Figura 1. El mecanismo está compuesto por la base esférica, el cuerpo del robot y un rodillo actuado que representa la acción motorizada en un plano vertical. En la figura, $\boldsymbol{\theta_x, \psi_x}$ y $\boldsymbol{\phi_x}$ representan los desplazamientos angulares de la esfera, el cuerpo y la rueda virtual, respectivamente. Los momentos de inercia de la esfera, del cuerpo y de la rueda virtual se denotan por $\boldsymbol{I_B, I_C}$ e $\boldsymbol{I_R}$, respectivamente. El radio de la esfera se representa como $\boldsymbol{r_B}$, mientras que $\boldsymbol{r_R}$ corresponde al radio de la rueda virtual. El parámetro $\boldsymbol{l}$ representa la distancia entre el centro de masa de la esfera y el centro de masa del cuerpo.

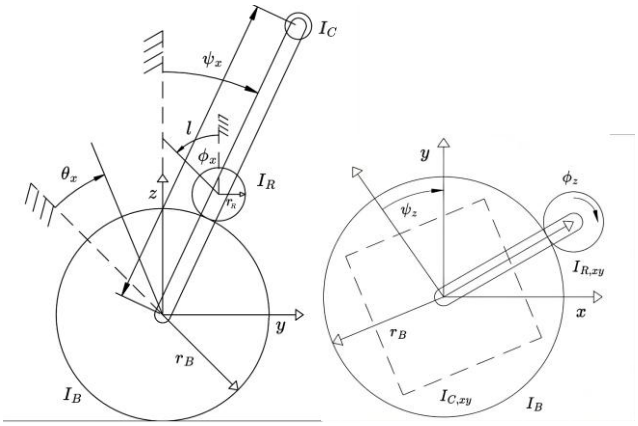


Figura 1: Modelo dinámico del ballbot: planos verticales $\boldsymbol{yz}$ y $\boldsymbol{xz}$ (izquierda) y plano horizontal $\boldsymbol{xy}$ (derecha). (van der Blonk, 2014)

Aplicando el método de Euler–Lagrange y definiendo los siguientes parámetros agregados:

$$\boldsymbol{\Lambda = m_B r_B^2 + I_B + m_C r_B^2 + m_R r_B^2 + \frac{r_B^2}{r_R^2} I_R} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\Gamma(\psi) = \left(m_C r_B l + m_R r_B (r_B + r_R)\right) \cos\psi - \frac{r_B^2}{r_R^2} I_R} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\Omega = I_C + m_C l^2 + m_R (r_B + r_R)^2 + \frac{r_B^2}{r_R^2} I_R} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\Delta = m_C g\, l + m_R g\, (r_B + r_R)} \quad (4)$$

es posible determinar que las dinámicas no lineales en cada plano vertical son:

$$\boldsymbol{\Lambda \ddot{\theta} + \Gamma(\psi)\ddot{\psi} - \left(m_C\, r_B\, l + m_R\, r_B (r_B + r_R)\right) \sin\psi\ \dot{\psi}^2 = 0} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\Gamma(\psi)\ \ddot{\theta} + \Omega\, \ddot{\psi} - \Gamma'(\psi)\ \dot{\theta}\, \dot{\psi} - \Delta \sin\psi = \tau} \quad (6)$$

Al linealizar en $\boldsymbol{\theta = \psi = 0}$, $\boldsymbol{\dot{\theta} = \dot{\psi} = 0}$, se obtiene:

$$\boldsymbol{\Gamma_0 = \left(m_C r_B l + m_R r_B (r_B + r_R)\right) - \frac{r_B^2}{r_R^2} I_R} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{D = \Omega - \frac{\Gamma_0^2}{\Lambda}} \quad (8)$$

Por lo que las aceleraciones resultantes son:

$$\ddot{\boldsymbol{\psi}} = \frac{(\boldsymbol{\Delta\psi} + \boldsymbol{\tau})}{\boldsymbol{D}} \tag{9}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = -\frac{\boldsymbol{\Gamma_0}}{\boldsymbol{\Lambda}} \frac{\boldsymbol{\Delta\psi} + \boldsymbol{\tau}}{\boldsymbol{D}} \tag{10}$$

En forma de espacio de estados con $\boldsymbol{x_v} = [\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\psi}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{\psi}}]^\top$:

$$\boldsymbol{A_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & -\frac{\boldsymbol{\Gamma_0}}{\boldsymbol{\Lambda}}\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{D}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\boldsymbol{\Delta}}{\boldsymbol{D}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ -\frac{\boldsymbol{\Gamma_0}}{\boldsymbol{\Lambda}}\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{D}} \\ \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{D}} \end{bmatrix} \tag{12}$$

La rotación de guiñada $\boldsymbol{\psi_z}$ tiene una inercia $\boldsymbol{I_{xy}} = \boldsymbol{I_{C,xy}} + \boldsymbol{I_{R,xy}} + \boldsymbol{m_R}(\boldsymbol{r_B} + \boldsymbol{r_R})^2$, con el estado $\boldsymbol{xy} = [\boldsymbol{\psi_z}, \dot{\boldsymbol{\psi}}_{\boldsymbol{z}}]^\top$:

$$\boldsymbol{A_{yaw}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B_{yaw}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{1}/\boldsymbol{I_{xy}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

Definiendo el vector de estado completo $\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{\theta_x},\ \boldsymbol{\psi_x},\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\boldsymbol{x}},\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_{\boldsymbol{x}},\ \boldsymbol{\theta_y},\ \boldsymbol{\psi_y},\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_{\boldsymbol{y}},\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_{\boldsymbol{y}},\ \boldsymbol{\psi_z},\ \dot{\boldsymbol{\psi}}_{\boldsymbol{z}}]^\top$, y las entradas $\boldsymbol{u} = [\boldsymbol{\tau_x},\ \boldsymbol{\tau_y},\ \boldsymbol{\tau_z}]^\top$, el modelo linealizado global queda expresado como:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A_v} & \mathbf{0}_{4\times4} & \mathbf{0}_{4\times2} \\ \mathbf{0}_{4\times4} & \boldsymbol{A_v} & \mathbf{0}_{4\times2} \\ \mathbf{0}_{2\times4} & \mathbf{0}_{2\times4} & \boldsymbol{A_{yaw}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{10\times10} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B_v} & \mathbf{0}_{4\times1} & \mathbf{0}_{4\times1} \\ \mathbf{0}_{4\times1} & \boldsymbol{B_v} & \mathbf{0}_{4\times1} \\ \mathbf{0}_{2\times1} & \mathbf{0}_{2\times1} & \boldsymbol{B_{yaw}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{10\times3} \tag{15}$$

Para medición completa del estado, se tiene que $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{I_{10}}$ y $\boldsymbol{D} = \mathbf{0}$.

Por otro lado, el Regulador Lineal Cuadrático (LQR, por sus siglas en inglés) es una estrategia de control óptimo para sistemas lineales invariantes en el tiempo representados en forma de espacio de estados:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}), \quad \boldsymbol{x}(\mathbf{0}) = \boldsymbol{x_0} \tag{16}$$

donde $\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{n}}$ es el vector de estado y $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t}) \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{m}}$ es la entrada de control. El objetivo es regular el sistema hacia el punto de equilibrio minimizando un índice de desempeño que equilibre las desviaciones del estado y el esfuerzo de control. Cuando la regulación se centra en variables seleccionadas, se introduce un mapeo lineal:

$$\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{t}) \tag{17}$$

donde $\boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}) \in \mathbb{R}^{\boldsymbol{p}}$ representa las salidas de desempeño, tales como desviaciones de posición o ángulo. El desempeño del control se cuantifica mediante el funcional de costo cuadrático:

$$\boldsymbol{J} = \int_0^\infty [\, \boldsymbol{z}^\top(\boldsymbol{t})\, \boldsymbol{Q_z}, \boldsymbol{z}(\boldsymbol{t}) + \boldsymbol{u}^\top(\boldsymbol{t})\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{t})]\, \boldsymbol{dt} \tag{18}$$

donde $\boldsymbol{Q_z} \succeq \mathbf{0}$ pondera las desviaciones en $\boldsymbol{z(t)}$, y $\boldsymbol{R} \succ \mathbf{0}$ penaliza esfuerzos excesivos de control, determinando el compromiso entre precisión y consumo de energía. La ley de control óptima por realimentación que minimiza $\boldsymbol{J}$ está dada por:

$$\boldsymbol{u(t)} = -\boldsymbol{Kx(t)} \quad (\mathbf{19})$$

donde $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{R^{-1}B^{\top}P}$ y $\boldsymbol{P}$ es la solución única definida positiva de la ecuación algebraica de Riccati en tiempo continuo:

$$\boldsymbol{A^{\top}P + PA - PBR^{-1}B^{\top}P + C^{\top}Q_zC = 0} \quad (\mathbf{20})$$

Esta formulación garantiza estabilidad asintótica y un desempeño óptimo para las matrices de ponderación $\boldsymbol{Q_z}$ y R seleccionadas. (Levine, 2011), (Gu, Petkov, & Konstantinov, 2014).

PARTE EXPERIMENTAL

La parte experimental se divide en tres etapas principales. En primer lugar, se encuentra el diseño mecánico del prototipo, describiendo la estructura física del robot, los criterios de construcción y los componentes empleados para materializar la plataforma ballbot. Posteriormente, se presenta el sistema de actuación e instrumentación, detallando los actuadores, sensores y elementos electrónicos utilizados para la adquisición de datos y la interacción con el sistema físico. Finalmente, se describe la implementación del controlador, incluyendo la obtención del modelo en espacio de estados, el procedimiento de sintonización del regulador LQR y el entorno de simulación empleado para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

El prototipo desarrollado corresponde a un robot tipo ballbot diseñado bajo criterios de modularidad, bajo costo y facilidad de reproducción. La estructura mecánica fue diseñada mediante herramientas CAD y fabricada mediante impresión 3D utilizando piezas ensamblables que permiten realizar modificaciones y mantenimiento de manera sencilla. El sistema está compuesto por una esfera que actúa como elemento de locomoción, una estructura superior que contiene la electrónica y los actuadores, y un conjunto de mecanismos encargados de transmitir el movimiento de los motores hacia la esfera. El diseño del ballbot se encuentra esbozado en la Figura 2. Durante el diseño se buscó minimizar el peso total de la estructura y mantener el centro de masa por encima del centro geométrico de la esfera, condición necesaria para generar el comportamiento dinámico característico de un péndulo invertido. La disposición de los componentes electrónicos y mecánicos fue seleccionada para favorecer la estabilidad del sistema y reducir posibles vibraciones durante la operación.

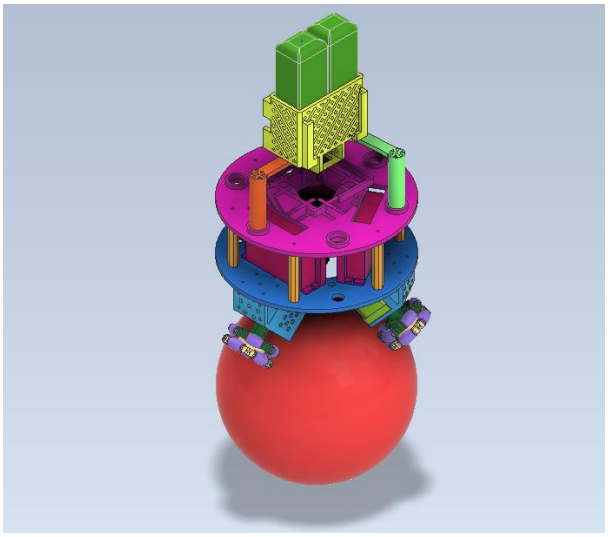


Figura 2. Vista general del ballbot diseñado.

Con el propósito de representar adecuadamente la dinámica del robot equilibrado sobre una esfera, fue necesario determinar las propiedades físicas y geométricas de cada uno de los componentes que conforman el sistema. A partir de las dimensiones del prototipo desarrollado y de las especificaciones técnicas de los elementos mecánicos y electrónicos empleados, se obtuvieron los parámetros utilizados en la construcción del modelo dinámico y en las simulaciones numéricas. La Tabla 1 resume las principales magnitudes consideradas, incluyendo masas, dimensiones características, momentos de inercia y constantes físicas necesarias para la formulación matemática del sistema y el posterior diseño del controlador LQR.

Tabla 1. Parámetros físicos y geométricos del prototipo ballbot.

Parámetro	Descripción	Valor
l	Distancia entre el centro de masa del balón y el centro de masa del cuerpo	0.300 m
g	Aceleración gravitacional	9.81 m/s²
α	Ángulo de inclinación de las ruedas omnidireccionales	45°
β	Ángulo de posición horizontal de las ruedas omnidireccionales	0°
m_B	Masa del balón	0.268 kg
r_B	Radio del balón	0.105 m
I_B	Momento de inercia del balón	1.9698×10^{-3} kg·m²
m_C	Masa total del cuerpo	1.996 kg
m_{C1}	Masa de la parte superior del cuerpo	1.502 kg
m_{C2}	Masa de la parte inferior del cuerpo	0.494 kg
A_C	Ancho del cuerpo	0.105 m
h_{CT}	Altura total del cuerpo	0.348637 m
h_{C1}	Altura de la parte superior del cuerpo	0.214 m
h_{C2}	Altura de la parte inferior del cuerpo	0.13111 m
d_{C1}	Distancia entre el eje de rotación y el centro de masa de la parte superior	0.346637 m
d_{C2}	Distancia entre el eje de rotación y el centro de masa de la parte inferior	0.1723185 m
$I_C{}'$	Momento de inercia del cuerpo en los planos yz/xz	2.0921×10^{-1} kg·m²
$I_{C_{xy}}{}'$	Momento de inercia del cuerpo en el plano xy	1.1×10^{-2} kg·m²
I_{C1}	Momento de inercia de la parte superior respecto a su centro de masa	9.872×10^{-3} kg·m²
I_{C2}	Momento de inercia de la parte inferior respecto a su centro de masa	2.107×10^{-3} kg·m²
$I_{C1}{}'$	Momento de inercia de la parte superior respecto al eje de rotación	0.192436 kg·m²
$I_{C2}{}'$	Momento de inercia de la parte inferior respecto al eje de rotación	1.677×10^{-2} kg·m²
m_R	Masa de la rueda	0.049 kg
m_{RV}	Masa de la rueda actuadora virtual	0.375 kg
m_{RVT}	Masa total de las tres ruedas virtuales	1.125 kg
r_R	Radio de la rueda	0.030 m
I_R	Momento de inercia de la rueda en los planos yz/xz	2.05875×10^{-5} kg·m²
I_{RV}	Momento de inercia de la rueda virtual	2.205×10^{-5} kg·m²
$I_{R_{xy}}$	Momento de inercia de la rueda en el plano xy	4.1175×10^{-5} kg·m²
m_M	Masa del motor	0.326 kg
I_M	Momento de inercia del rotor del motor	5.4×10^{-6} kg·m²

Por otro lado, el accionamiento del robot se realiza mediante motores a pasos acoplados a mecanismos de transmisión que generan el movimiento de la esfera en los planos de balanceo correspondientes. La selección de este tipo de actuadores se realizó considerando su disponibilidad comercial, facilidad de control y precisión de posicionamiento, características que los convierten en una alternativa adecuada para plataformas educativas y de investigación. Para la estimación de la orientación del sistema se empleó una unidad de medición inercial (IMU), la cual proporciona información de aceleración y velocidad angular necesaria para determinar los ángulos de inclinación del robot respecto a la vertical. Estas mediciones constituyen las variables de estado requeridas para la implementación del esquema de control por realimentación de estados. Asimismo, la arquitectura electrónica fue diseñada para permitir la adquisición de datos y la futura implementación del controlador en tiempo real.

El diseño y validación inicial del controlador se llevaron a cabo en el entorno MATLAB/Simulink utilizando el modelo dinámico linealizado obtenido a partir de la formulación de Euler-Lagrange. Con base en dicho modelo se construyó la representación en espacio de estados del sistema, la cual fue empleada para sintetizar un Regulador Lineal Cuadrático (LQR). Las matrices de ponderación $\boldsymbol{Q}$ y $\boldsymbol{R}$ fueron seleccionadas mediante un proceso iterativo de ajuste, buscando un compromiso adecuado entre rapidez de respuesta, estabilidad y esfuerzo de control. Una vez obtenida la matriz de ganancias óptima, se realizaron simulaciones numéricas considerando diferentes condiciones iniciales y escenarios con perturbaciones externas. Estas pruebas permitieron evaluar la capacidad del controlador para estabilizar el sistema alrededor de la posición de equilibrio y analizar su desempeño frente a variaciones en los estados del robot.

RESULTADOS

Para el diseño del controlador LQR, se utilizó la siguiente matriz después del proceso de parametrización:

$$\boldsymbol{A_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{-75} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{34.1594} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B_v} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{25.6412} \\ \mathbf{-6.4570} \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{A_{yaw}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{B_{yaw}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{-22.2295} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A_v} & \mathbf{0_{4\times4}} & \mathbf{0_{4\times2}} \\ \mathbf{0_{4\times4}} & \boldsymbol{A_v} & \mathbf{0_{4\times2}} \\ \mathbf{0_{2\times4}} & \mathbf{0_{2\times4}} & \boldsymbol{A_{yaw}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{10\times10}, \quad \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B_v} & \mathbf{0_{4\times1}} & \mathbf{0_{4\times1}} \\ \mathbf{0_{4\times1}} & \boldsymbol{B_v} & \mathbf{0_{4\times1}} \\ \mathbf{0_{2\times1}} & \mathbf{0_{2\times1}} & \boldsymbol{B_{yaw}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{10\times3}, \quad \boldsymbol{C} = \boldsymbol{I_{10}}, \quad \boldsymbol{D} = \mathbf{0}. \tag{23}$$

Las matrices de ponderación empleadas en la síntesis del controlador se seleccionaron de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{diag}[\mathbf{100} \quad \mathbf{200} \quad \mathbf{10} \quad \mathbf{50} \quad \mathbf{100} \quad \mathbf{200} \quad \mathbf{10} \quad \mathbf{50} \quad \mathbf{1} \quad \mathbf{1}], \quad \boldsymbol{R} = \mathbf{5}\boldsymbol{I_3} \tag{24}$$

lo cual dio como resultado la siguiente matriz de ganancias por realimentación:

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{-4.4} & \mathbf{-94.2} & \mathbf{-3.8} & \mathbf{-23.5} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{-4.4} & \mathbf{-94.2} & \mathbf{-3.8} & \mathbf{-23.5} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{-0.4} & \mathbf{-0.4} \end{bmatrix} \quad \mathbf{25}$$

Se realizaron simulaciones numéricas en MATLAB para evaluar el desempeño del Regulador Lineal Cuadrático (LQR) diseñado en la estabilización del sistema ballbot. Se consideraron dos escenarios: (I) estabilización sin perturbaciones externas y (II) estabilización bajo la acción de perturbaciones externas aplicadas a los estados del sistema. En ambos escenarios se emplearon las mismas condiciones iniciales y un tiempo de simulación de 4 segundos.

En el primer escenario, las condiciones iniciales se establecieron en valores distintos de cero, a saber,

$$\boldsymbol{x_0 = [0.3; -0.3; -0.2; 0.2; -0.1; 0.1; 0.4; -0.4; 0.5; -0.5]} \qquad \mathbf{26}$$

para desplazar el ballbot de su posición de equilibrio vertical. El controlador LQR reguló exitosamente los estados del sistema hasta llevarlos a cero, logrando una respuesta transitoria suave, con un sobreimpulso mínimo y un tiempo de establecimiento corto. Las entradas de control se mantuvieron dentro de límites admisibles, lo que indica que las ganancias diseñadas son adecuadas para una implementación práctica. Los resultados confirman que el controlador garantiza la estabilidad asintótica del sistema en lazo cerrado en ausencia de perturbaciones. La Figura 3 muestra la evolución temporal de los estados en los planos verticales cuando el sistema se comporta libremente.

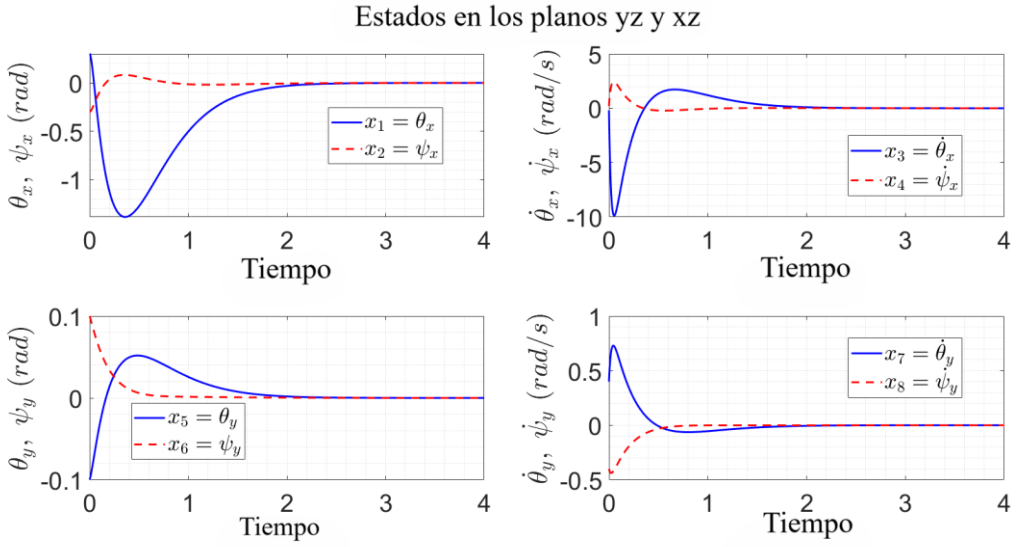


Figura 3: Estados en los planos verticales sin perturbaciones.

En el segundo escenario, se introdujo una perturbación externa a partir de $(\boldsymbol{t = 2s})$ con una duración de $(\boldsymbol{0.25s})$, con el fin de evaluar la robustez de la estrategia de control propuesta. A pesar de las perturbaciones repentinas, el controlador LQR compensó eficazmente las desviaciones, restableciendo el ballbot a su configuración de equilibrio en un corto intervalo de tiempo. La respuesta transitoria presentó únicamente un ligero incremento en el sobreimpulso en comparación con el caso sin perturbaciones, mientras que las entradas de control mostraron variaciones moderadas sin exceder los límites de saturación. Estos resultados demuestran la robustez del diseño LQR frente a perturbaciones externas moderadas. La Figura 4 muestra la evolución temporal de los estados en los planos verticales cuando se aplica una perturbación al sistema.

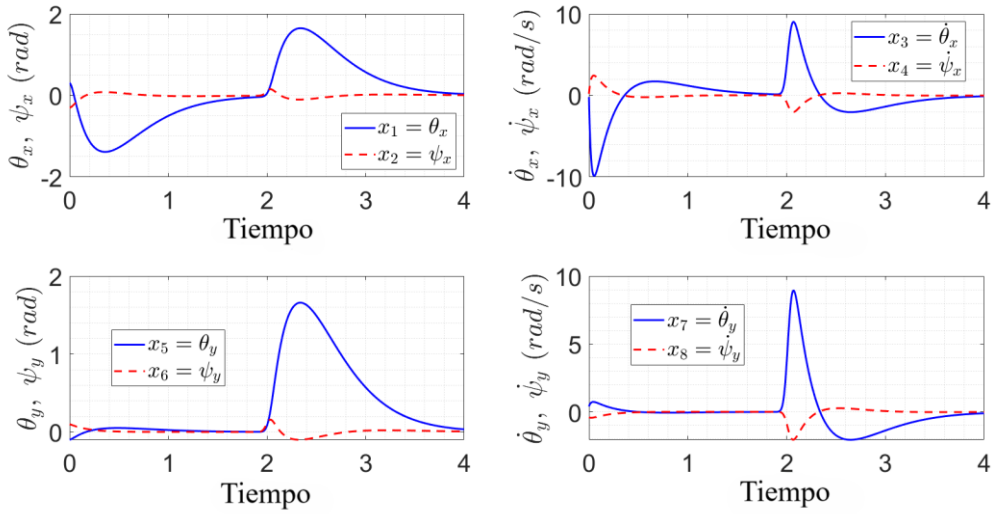


Figura 4: Estados en el plano vertical con perturbación.

CONCLUSIONES

Las simulaciones numéricas demuestran que el Regulador Lineal Cuadrático (LQR) diseñado proporciona una estabilización efectiva del sistema ballbot tanto en condiciones ideales como en presencia de perturbaciones externas moderadas. En ausencia de perturbaciones, el controlador garantiza la convergencia asintótica de todos los estados del sistema hacia la posición de equilibrio, presentando un sobreimpulso mínimo, respuestas transitorias suaves y entradas de control dentro de límites prácticos. Cuando el sistema es sometido a perturbaciones externas, el controlador LQR compensa exitosamente las desviaciones, restaurando la configuración vertical del sistema con incrementos únicamente leves en el sobreimpulso transitorio y variaciones moderadas en el esfuerzo de control. Estos resultados confirman la robustez de la estrategia de control y su capacidad para mantener la estabilidad ante perturbaciones de corta duración. En conjunto, este estudio valida la idoneidad del enfoque LQR como un método práctico y confiable para su implementación en sistemas ballbot reales, proporcionando tanto una regulación precisa como una alta resiliencia frente a perturbaciones externas. Asimismo, el marco de simulación desarrollado constituye una herramienta educativa eficaz para la exploración de conceptos avanzados de control en sistemas dinámicos multivariables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fankhauser, P., & Gwerder, C. (2010). *Modeling and Control of a Ballbot.* ETH Zürich.
2. Gu, D. W., Petkov, P. H., & Konstantinov, M. M. (2014). *Robust Control Design with MATLAB®.* Springer London.
3. Kumagai, M., & Ochiai, T. (2010). Development of a Robot Balanced on a Ball - First Report, Implementation of the Robot and Basic Control. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 348–355.
4. Lauwers, T. B., Kantor, G. A., & Hollis, R. L. (2006). A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006)* (págs. 2884–2889). Orlando, FL, USA: IEEE.
5. Levine, W. S. (2011). *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods.* CRC Press.
6. van der Blonk, J. W. (2014). *Modeling and Control of a Ball-Balancing Robot.* University of Twente.

7. Fantoni, I., & Lozano, R. (2002). Nonlinear Control for Underactuated Mechanical Systems. Springer.
8. Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., & Rufer, A. (2002). JOE: A Mobile, Inverted Pendulum. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49(1), 107–114.
9. Hollis, R. (2017). Ballbot and Beyond. IEEE Robotics and Automation Magazine, 24(2), 42–51.
10. Nagarajan, U., Kantor, G., & Hollis, R. (2014). Trajectory Following and Push Recovery for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot. IEEE International Conference on Robotics and Automation.
11. Spong, M. W. (1998). Underactuated Mechanical Systems. Control Problems in Robotics and Automation, Springer.
12. Tsai, C. C., Huang, H. C., & Lin, S. C. (2010). Adaptive Neural Network Control of a Self-Balancing Two-Wheeled Scooter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(4), 1420–1428.

CÁLCULO DEL MOMENTO MAGNÉTICO ANÓMALO DÉBIL DEL QUARK TOP EN EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Eligio Cruz Albaro[1], Leonardo D. Contreras Hernández[1], Alejandro B. Gutiérrez Rodriguez[1], David Espinosa Gómez [2], David A. Pérez Carlos[1]

[1]Universidad Autónoma de Zacatecas, [2]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
elicruzalbaro88@gmail.com

RESUMEN

En el zoológico de las partículas subatómicas, el quark top es la partícula más masiva, pesa tanto como un núcleo de oro siendo de dimensión mucho más pequeña. En la actualidad, el acelerador de partículas más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) del CERN, permite producir millones de quarks top. Gracias a ello, los científicos han comenzado a estudiar con mayor precisión sus propiedades y su posible relación con la producción de nuevas partículas. Dado que el quark top es la partícula más masiva del Modelo Estándar (ME) de la física de partículas (teoría que describe las partículas elementales y sus interacciones), desempeña un papel fundamental en la física del bosón de Higgs y en diversas extensiones teóricas que buscan describir nueva física más allá del ME. En particular, sus propiedades influyen de manera significativa en la estabilidad del sector electrodébil. Por ello, obtener mediciones precisas de sus propiedades resulta clave para comprender la consistencia y los límites de validez del ME.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propone estudiar propiedades específicas del quark top, conocidas como los momentos dipolares anómalos débiles. Estas cantidades surgen a partir del vértice de interacción $\boldsymbol{Ztt}$ generados a nivel de un lazo en el contexto del ME. En particular, se determina el momento dipolar magnético anómalo débil (MDMAD) del quark top, mientras que su momento dipolar eléctrico débil no emerge a este nivel. Las contribuciones del ME al MDMAD del quark top surgen de los lazos que contienen a los bosones de norma, a los fermiones y/o el bosón de Higgs del ME. Es importante mencionar que se ha calculado en la literatura [1] el MDMAD de la partícula de interés, sin embargo, no se consideró la contribución del bosón de Higgs que se descubrió en el año 2012. En este presente estudio, consideramos y determinamos las contribuciones del bosón de Higgs h_0 al MDMAD del quark top, usamos también valores actuales y precisos de los parámetros involucrados. Nuestros resultados numéricos muestran que la contribución del bosón de Higgs al MDMAD del top resulta ser significativo. Aunque hasta el momento no hay datos experimentales que confirmen la existencia de las propiedades débiles del quark top. Sin embargo, se tienen programas exhaustivos de estudio del quark top en los colisionadores actuales como el LHC o el futuro colisionador como el ILC.

TEORÍA

El ME de la física de partículas es una teoría que describe de manera exitosa tres de las cuatro interacciones fundamentales del universo (electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil). El ME está constituido de 17 partículas y se clasifican en 2 grandes grupos: fermiones y bosones. Los fermiones en el ME explican la constitución de la materia, estás partículas se agrupan en 6 tipos de sabores de quarks y 6 tipos de leptones, todos los fermiones comparten características como tener un espín semientero y obedecen el principio de exclusión de Pauli. Por otro lado, los 5 bosones que describe el ME son partículas con espín entero, y a diferencia de los fermiones, estos no cumplen con el principio de exclusión de Pauli. Cada bosón actúa como portadora de una de las tres interacciones fundamentales que explica el ME: el fotón porta la interacción electromagnética, el gluón la interacción nuclear fuerte, y los bosones W y Z son los portadores de la interacción nuclear débil. Finalmente, el bosón de Higgs es la partícula fundamental encargada de generar masa a las

partículas que interactúan con él. Otra característica del ME es su consistencia con la mecánica cuántica y la relatividad especial. Por tal motivo se dice que es una teoría cuántica relativista que describe a las partículas como excitaciones o cuantos de un campo. También es importante mencionar que el ME a nivel matemático es una teoría de norma basada en el grupo $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$.

PARTE EXPERIMENTAL

Determinamos las amplitudes de transición que surgen del vértice de interacción $\boldsymbol{Ztt}$, cuando en el lazo circulan bosones (bosón W, bosón Z, gluón, fotón y bosón de Higgs) y quarks (top, bottom) del ME. En cuanto a las reglas de Feynman involucradas en estos procesos, se usaron las reglas de Feynman proporcionados en la referencia [2].

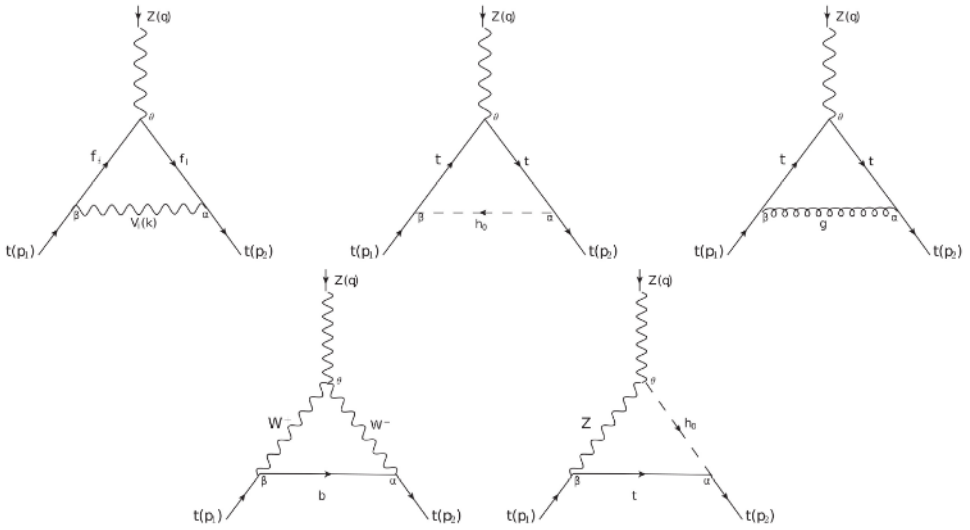


Figura 1: Diagramas de Feynman que contribuyen al MDMAD del quark top en el contexto del ME.

Las amplitudes de transición para las diferentes contribuciones que surgen a nivel de un lazo para el MDMAD del quark top se muestran en las ecuaciones (1) - (7). Es importante mencionar que en nuestros cálculos se utilizó la norma de 't Hooft-Feynman, ya que, a diferencia de la norma unitaria, en esta norma obtenemos resultados numéricos más consistentes con los resultados experimentales [3].

Con el propósito de resolver las amplitudes de transición antes mencionadas, implementamos el método de Passarino-Veltman en el entorno de la paquetería FeynCalc, este es una paquetería especializada en física de partículas. En este contexto extraemos los factores de forma asociadas al MDMAD del quark top. Posteriormente, utilizamos la paquetería Package-X para obtener los resultados numéricos para los factores de forma de interés.

$$M_t^{\mu}(ttZ) = (-1)i^6\left(\frac{g}{2\cos\theta_W}\right)^3 \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} u(p_2)\gamma^{\alpha}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right) \times \left(\frac{k+p_2+m_t}{(k+p_2)^2-m_t^2}\right)\gamma^{\mu}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)\left(\frac{k+p_1+m_t}{(k+p_1)^2-m_t^2}\right) \times \gamma^{\beta}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)\left[\frac{1}{k^2-m_Z^2}g_{\alpha\beta}\right]u(p_1), \tag{1}$$

$$M_t^{\mu}(Wbb) = (-1)i^6\left(\frac{g}{\sqrt{2}}\right)^2\left(\frac{g}{2\cos\theta_W}\right)\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2) \times \left(\gamma^{\alpha}P_L\right)\left(\frac{k+p_2+m_b}{(k+p_2)^2-m_b^2}\right)\gamma^{\mu}\left[\frac{2}{3}\sin\theta_W - P_L\right] \times \left(\frac{k+p_1+m_b}{(k+p_1)^2-m_b^2}\right)\left(\gamma^{\beta}P_L\right)\left(\frac{1}{k^2-m_W^2}g_{\alpha\beta}\right)u(p_1), \tag{2}$$

$$M_t^{\mu}(tt\gamma) = (-1)i^6\left(\frac{g}{2\cos\theta_W}\right)\left(\frac{-2}{3}e\right)^2\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2)\gamma^{\alpha}\left(\frac{k+p_2+m_t}{(k+p_2)^2-m_t^2}\right) \times \gamma^{\mu}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)\left(\frac{k+p_1+m_t}{(k+p_1)^2-m_t^2}\right)\gamma^{\beta}\left(\frac{1}{k^2}g_{\alpha\beta}\right)u(p_1), \tag{3}$$

$$M_t^{\mu}(tth_0) = (-1)i^6\left(\frac{g}{2\cos\theta_W}\right)\left(\frac{gm_t}{2M_W}\right)^2\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2)\left(\frac{k+p_2+m_t}{(k+p_2)^2-m_t^2}\right) \times \gamma^{\mu}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)\left(\frac{k+p_1+m_t}{(k+p_1)^2-m_t^2}\right)\left(\frac{1}{k^2-m_H^2}\right)u(p_1), \tag{4}$$

$$M_t^{\mu}(ttg) = (-1)i^6\left(\frac{g_s^2 g}{2\cos\theta_W}\right)\frac{1}{2}\delta_{ab}\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2)\gamma^{\alpha}\left(\frac{k+p_2+m_t}{(k+p_2)^2-m_t^2}\right) \times \gamma^{\mu}\left(P_L - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)\left(\frac{k+p_1+m_t}{(k+p_1)^2-m_t^2}\right)\gamma^{\beta}\left(\frac{1}{k^2}g_{\alpha\beta}\right)u(p_1), \tag{5}$$

$$M_t^{\mu}(WWb) = (-1)i^6\left(\frac{g}{\sqrt{2}}\right)^2(g\cos\theta_W)\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2)\left(\gamma^{\alpha}P_L\right)\left(\frac{k+m_b}{k-m_b^2}\right) \times \left(\gamma^{\beta}P_L\right)u(p_1)\left(\frac{1}{(p_2-k)^2-m_W^2}g_{\beta\beta 1}\right) \times [g^{\alpha\beta}(2k-p_2-p_1)^{\mu} + g^{\beta\mu}(-k+p_2+2p_{1]})^{\alpha} + g^{\mu\alpha}(-k+2p_2-p_1)^{\beta}]\left(\frac{1}{(k-p_1)^2-m_W^2}g_{\alpha\alpha_1}\right), \tag{6}$$

$$M_t^{\mu}(h_0Zt) = (-1)i^6\left(\frac{g}{\cos\theta_W}m_Z\right)\left(\frac{gm_t}{2m_W}\right)\left(\frac{g}{2\cos\theta_W}\right)\int\frac{d^4k}{(2\pi)^4}\bar{u}(p_2)$$
$$\times\left(\frac{k+m_t}{k^2-m_t^2}\right)\gamma^{\beta}\left(P_L-\frac{4}{3}\sin^2\theta_W\right)u(p_1)\left(\frac{1}{(p_1-k)^2-m_Z^2}g_{\nu\beta}\right)$$
$$\times g^{\nu\mu}\left(\frac{1}{(p_2-k)^2-m_{h_0}^2}\right). \qquad (7)$$

RESULTADOS

Para llevar a cabo el análisis numérico de las contribuciones que surgen a nivel de un lazo del vértice $\boldsymbol{Ztt}$ para el MDMAD del quark top, en la Tabla 1 proporcionamos los valores asignados a los parámetros involucrados en nuestro estudio:

Parámetro	Valor numérico	Referencia
M_t	172.520 GeV	[4]
M_b	4.183 GeV	[4]
M_Z	91.188 GeV	[4]
M_W	80.369 GeV	[4]
M_H	125.200 GeV	[4]
$\sin^2\theta_w$	0.23126	[4]

Tabla 1: Valores numéricos asignados a los parámetros involucrados en nuestro estudio del MDMAD del quark top.

En la Tabla, 2 mostramos los resultados numéricos obtenidos para las diferentes contribuciones al MDMAD del quark top:

ABC	μ_t^Z
γtt	-6.46×10^{-4}
Ztt	$-2.94\times10^{-4}-i2.87\times10^{-3}$
Wbb	$-1.53\times10^{-3}+i1.55\times10^{-3}$
tth	$1.54\times10^{-3}+i1.31\times10^{-3}$
gtt	-2.93×10^{-2}
Zth_0	$1.63\times10^{-4}-i2.28\times10^{-4}$
WWb	$1.03\times10^{-2}+i1.90\times10^{-3}$
Total	$-1.98\times10^{-2}+i1.66\times10^{-3}$

Tabla 2: Contribuciones de las partículas del ME para el MDMAD del quark top.

CONCLUSIONES

En este trabajo, determinamos la contribución del bosón de Higgs al MDMAD del quark top y encontramos que dicha contribución numérica es *1.63 x 10-4 – i2.28 x 10-4*. Esta contribución no es despreciable. Por otro lado, comparando nuestro resultado con lo reportado en la literatura [1], notamos que, en nuestro caso, la contribución total del MDMAD del quark top tiene un valor más grande. Además, para nuestros parámetros involucrados se utilizaron valores experimentales actualizados y precisos.

Actualmente no se tienen mediciones experimentales del MDMAD del quark top. Sin embargo, colisionadores como el LHC, el ILC, entre otros, tienen en su programa de investigación estudiar las propiedades del quark top. La medición experimental del MDMAD del quark top puede proporcionarnos una visión más completa sobre el sector electrodébil del ME.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Bernabéu, D. Comelli, L. Lavoura and J. P. Silva 1996 *Phys. Rev*. D 53 5222.
2. J. W. F. Valle and J. Romao, *Neutrinos in high energy and astroparticle physics*. John Wiley & Sons, 2015.
3. J. Papavassiliou and C. Parrinello, *Gauge-invariant top quark form factors from e^+ e^- experiments,* Phys. Rev. D, vol. 50, no. 5, pp. 3059–3074, Sep. 1994, doi: 10.1103/PhysRevD.50.3059.
4. S. Navas *et al*. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 110, 030001 (2024) and 2025 update.
5. B. L. Roberts and W. J. Marciano, *Lepton Dipole moments*. World Scientific, 2010.
6. M. E. Peskin and D. V. Schroeder, *An introduction to quantum field theory*. Westview Press, 1995.
7. D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*. Wiley-VCH, 1987.

INTERFERÓMETRO HOLOGRÁFICO DIGITAL QUE EMPLEA SECUENCIALMENTE TRES DIRECCIONES DE ILUMINACIÓN USADO PARA OBTENER PARÁMETROS MECÁNICOS EN TEJIDO BIOLÓGICO

María del Socorro Hernández-Montes, Gloria del Rosario Frausto Rea

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
mhernandez@cio.mx; gloriaz@cio.mx

RESUMEN

La alta exposición del ser humano a la radiación solar ha generado alteraciones e incluso daños en la piel, desde quemaduras, resequedad y a largo plazo cáncer[1-4]. Estos cambios pueden afectar los parámetros mecánicos del tejido, por lo que es importante poder analizarlo. Existe una gran variedad de técnicas para estudiar el comportamiento mecánico del tejido[5-8], con la desventaja de que estas técnicas son sumamente invasivas provocando cambios externos en la muestra y en consecuencia alteración en los resultados. En este trabajo se propone el uso de un arreglo interferométrico basado en el fenómeno de moteado, dicho arreglo da la posibilidad de obtener los desplazamientos en las direcciones x, y y z, los cuales sirven para obtener los parámetros mecánicos del objeto como es la rigidez y el módulo de Young. La muestra es colocada en el arreglo óptico y se le aplica una fuerza externa por medio de una bocina la cual es controlada con ayuda de un generador de funciones, dicha muestra es analizada antes y después de ser sometida a una dosis de radiación ultravioleta. Los resultados muestran aumento en los parámetros mecánicos después de aplicarse una dosis de radiación al tejido. Al aplicar una dosis de radiación ultravioleta en el tejido se notó alteraciones en las características mecánicas del mismo, haciéndolo más rígido. Cabe señalar que el cambio no se ve a simple vista, pero con el procedimiento propuesto fue posible detectar las modificaciones en la muestra.

INTRODUCCIÓN

El estudio de muestras biológicas es de vital importancia para conocer sus características, así como comprender su comportamiento bajo diferentes condiciones. Pero en particular, para tejido biológico como la piel se ha realizado una gran variedad de estudios a lo largo del tiempo ya que es el órgano más grande del cuerpo y este se encuentra expuesto a las condiciones ambientales, factores químicos, mecánicos y biológicos que pueden provocar enfermedades o daños en el tejido[9]. Otro factor importante que puede alterar a este tejido es la radiación ultravioleta a la cual estamos expuestos diariamente gracias a los rayos solares. Así que, analizar este tipo de tejidos es de gran interés en áreas como la ingeniería biomédica, medicina, materiales, entre otros[10-12].

Adicionalmente, es importante conocer los parámetros biomecánicos como deformaciones, viscoelasticidad, rigidez y elasticidad en el tejido, ya que con esto se entenderá de mejor forma las características y el estado de la piel[13-17]. Pero para llegar a esta información se ha empleado una gran variedad de técnicas que han servido para estudiar la piel, y hablamos tanto de métodos invasivos como no invasivos. Algunas técnicas invasivas usadas para obtener información de la piel son biopsias, citologías y pruebas de indentación[18-21], mientras que dentro de los métodos no invasivos se encuentran ultrasonido, elastografía, tomografía de coherencia óptica, microscopía confocal de reflectancia e interferometría holográfica digital[22-35], por mencionar algunos.

En el presente trabajo se muestra la aplicación de un arreglo de interferometría holográfica digital (DHI) con tres iluminaciones secuenciales el cual se usa para analizar una muestra de piel humana con la finalidad de obtener sus parámetros mecánicos antes y después de ser sometida a una dosis de radiación ultravioleta. La ventaja que se tiene con este arreglo DHI de tres iluminaciones es que nos permite calcular los desplazamientos en la dirección $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{y}$ y $\boldsymbol{z}$, y con ello relacionarlo con ciertas

ecuaciones para calcular parámetros mecánicos como el Módulo de Young y la rigidez de la muestra bajo estudio.

TEORÍA Y PARTE EXPERIMENTAL

La Figura 1 muestra el arreglo óptico de interferometría holográfica digital, el cual nos da la información en las direcciones, x, y y z. La configuración óptica consta de un láser monocromático de 532 nm y 1 W de potencia, cuyo haz se dirige hacia un cubo divisor (CD) el cual se encarga de separar el haz en dos: el primero denominado haz de referencia y el segundo haz objeto. Ambos haces son transportados por medio de una fibra óptica monomodal. La muestra es iluminada secuencialmente desde 3 posiciones no colineales (P1, P2 y P3) y la luz reflejada del objeto es colectada por un sistema de lente-apertura (L y A) y dirigida hacia un cubo combinador (CC) que transmite el haz objeto al sensor de la cámara para interferir con el haz de referencia y se forme el patrón de interferencia. La cámara usada tiene una resolución espacial de 800 x 600 pixeles, con un tamaño del sensor de 6.45 µm.

Para inducir los desplazamientos en la superficie de la muestra, esta fue sometida a una presión sonora la cual fue producida por una bocina activada por una señal senoidal proveniente del segundo canal de un generador de funciones (GF). Para encontrar la frecuencia del primer modo de vibración para la muestra de piel fue necesario realizar un barrido de frecuencias y se encontró a 1.1 kHz. Mientras que el primer canal de salida del GF produce una señal que actúa como trigger para sincronizar el proceso de captura de imágenes de interferencia.

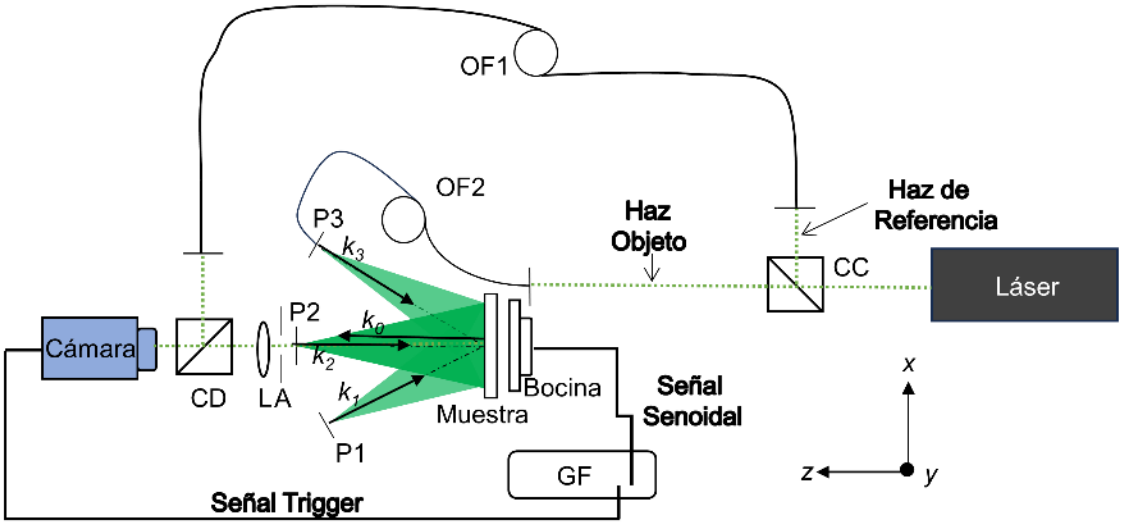


Fig. 1. Configuración óptica, $\mathbf{k_o}, \mathbf{k_j}$, $\mathbf{j = 1, 2, 3}$ son vectores unitarios de las direcciones de observación y de iluminación y las cuales son usadas para encontrar el vector de sensibilidad.

El holograma es registrado antes y después de ser deformada la muestra. Posteriormente, se aplica el algoritmo de transformada de Fourier 2D[36] en ambas imágenes y esto genera tres términos, la función de fondo y el espectro de orden $\pm\mathbf{1}$. Se filtra uno de los ordenes, luego se centra y se aplica la transformada inversa de Fourier donde se obtiene un número complejo, el cual es usado para obtener la fase envuelta ($\boldsymbol{\varphi}$). Posteriormente, la fase se desenvuelve para obtener una fase óptica suave ($\boldsymbol{\Delta\varphi'}$). Es importante mencionar que todo el procedimiento es aplicado a cada una de las posiciones de iluminación del sistema óptico y esta información servirá para calcular los desplazamientos $\boldsymbol{d_x}$, $\boldsymbol{d_y}$ and $\boldsymbol{d_z}$ usando la siguiente expresión:

$$[\mathbf{d}_{\mathbf{x,y,z}}] = \frac{\lambda}{2\pi}[\Delta\boldsymbol{\varphi}'_{\mathbf{n}}][\mathbf{v}_{\mathbf{n\,x,y,z}}]^{-\mathbf{1}} \quad (1)$$

$\Delta\boldsymbol{\varphi'}_{\boldsymbol{n}}$ son las diferencias de fase para las tres posiciones de iluminación, $\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{x,y,z}}$ son los vectores unitarios de sensibilidad ($\boldsymbol{v_n} = \boldsymbol{k_i} - \boldsymbol{k_o}$). Con esta información es posible obtener los parámetros mecánicos como el Módulo de Young ($\boldsymbol{E}$) y la rigidez ($\boldsymbol{k}$) de la muestra, mediante las siguientes expresiones,

$$\boldsymbol{E} = \frac{\mathbf{3(1-\nu^2)qr^4}}{\mathbf{16h^3 d_{zmax}}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{k} = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{dz}} \tag{3}$$

donde $\boldsymbol{q}$ es la carga aplicada en la dirección normal a la superficie de la muestra; $\boldsymbol{h}$ y $\boldsymbol{r}$ son el espesor y el radio de la muestra, respectivamente. La muestra usada es tejido humano con un grosor de 2 mm de espesor, diámetro de 20 mm y área (*A*) de ~0.000314 $\boldsymbol{m^2}$, la cual se fijó con una montura circular, se colocó en el arreglo óptico y se le aplicó una onda sonora con una presión ($\boldsymbol{P_r}$) de $\mathbf{0.963}\ \boldsymbol{Pa}$. $\boldsymbol{F}$ es la fuerza aplicada a la muestra y se calculó empleando la expresión: $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{P_r A}$ dando como resultado una fuerza aplicada de $\mathbf{304.21}\ \mu\boldsymbol{N}$.

RESULTADOS

Es importante mencionar que la información de fase, así como los parámetros mecánicos fueron calculados antes y después de que la muestra fuera sometida a una dosis de radiación ultravioleta de $\mathbf{0.030}\ \boldsymbol{J/cm^2}$ durante $\mathbf{10}$ segundos.

En la Figura 2 y 3 se muestran los mapas de fase desenvuelta para cada una de las posiciones de iluminación, así como los desplazamientos obtenidos en las tres direcciones ($\boldsymbol{dx}$, $\boldsymbol{dy}$ y $\boldsymbol{dz}$). La Figura 2 muestra los resultados antes de que la piel fuera sometida a una dosis de radiación, mientras que la Figura 3 presenta los datos obtenidos cuando la muestra ya contaba con una dosis de radiación ultravioleta.

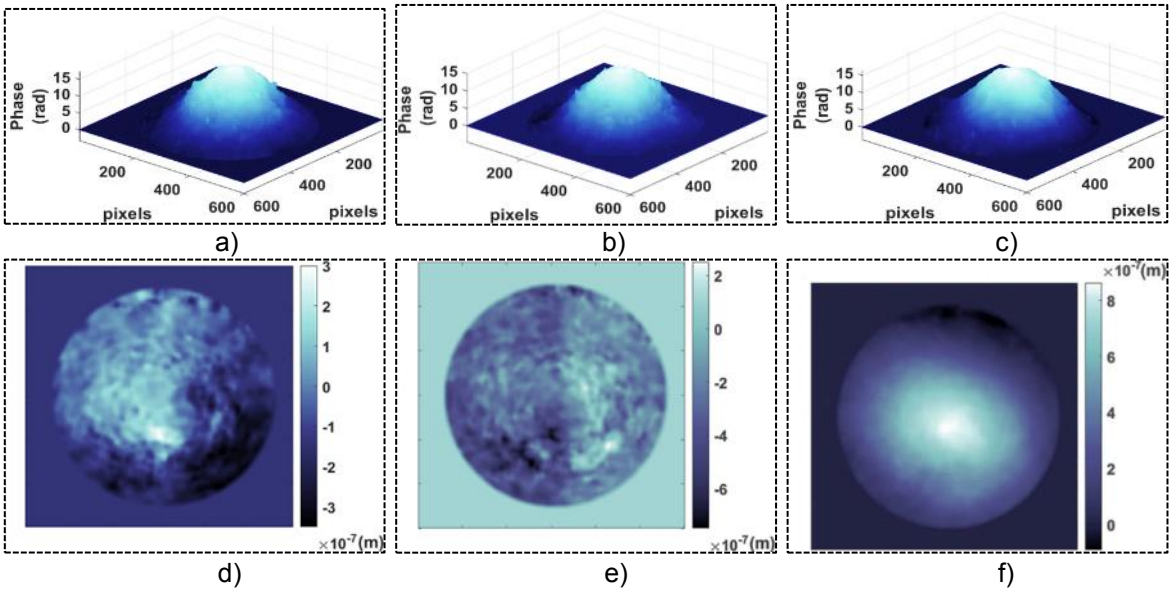


Fig. 2. Mapas de fase desenvuelta para las posiciones de iluminación a) P1, b) P2 y c) P3; y mapas de desplazamientos en la dirección d) $\mathbf{x}$, e) $\mathbf{y}$ y f) $\mathbf{z}$, para la muestra biológica sin radiación ultravioleta.

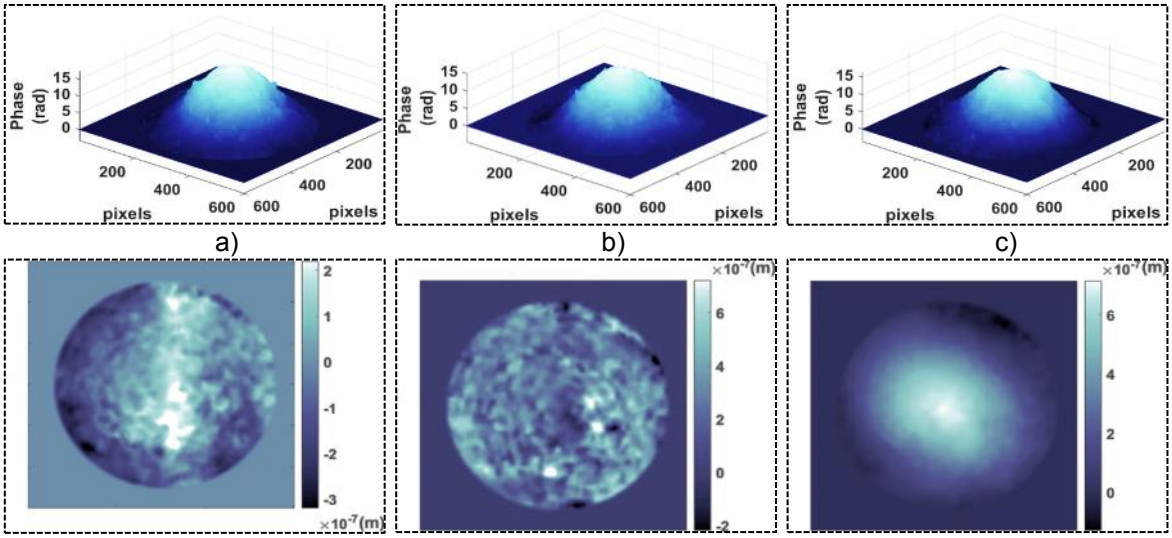


Fig. 3. Mapas de fase desenvuelta para las posiciones de iluminación a) P1, b) P2 y c) P3; y mapas de desplazamientos en la dirección d) $\mathbf{x}$, e) $\mathbf{y}$ y f) $\mathbf{z}$, para la muestra biológica con radiación ultravioleta.

Los valores obtenidos de la muestra biológica antes y después de ser sometida a una dosis de radiación ultravioleta se mencionan a continuación. Para la piel sin ninguna alteración se tiene los siguientes desplazamientos en las direcciones: $\boldsymbol{dx} = \mathbf{-0.344}$ µm, $\boldsymbol{dy} = \mathbf{-0.730}$ µm y $\boldsymbol{dz} = \mathbf{0.863}$ µm. Mientras que los desplazamientos que se calcularon después de aplicarse la radiación UV al tejido fueron: $\boldsymbol{dx} = \mathbf{-0.310}$ µm, $\boldsymbol{dy} = \mathbf{0.710}$ µm y $\boldsymbol{dz} = \mathbf{0.714}$ µm.

En el caso de los desplazamientos se puede notar un ligero decremento en los valores de desplazamiento en la dirección $\boldsymbol{dz}$, mientras que en los valores de la dirección $\boldsymbol{dx}$ y $\boldsymbol{dy}$ si hay una pequeña disminución en el valor, donde el signo negativo nos indica un cambio de dirección del movimiento. Podemos inferir que estas variaciones pueden darse debido a los cambios sufridos en la muestra producto de la dosis de radiación ultravioleta.

Posteriormente, se utilizaron las ecuaciones (2) y (3) para calcular los parámetros mecánicos. Para la muestra sin afectación de radiación UV, se obtuvo el E = 216.41 kPa y k= 352.40 N/m. Para la muestra con radiación UV los valores obtenidos son para el E = 245.98 kPa y para k = 426.09 N/m.

Analizando los valores de los parámetros mecánicos se puede apreciar que los valores del módulo de Young, así como de rigidez aumentan cuando se le aplica la dosis de radiación UV a la muestra, en comparación con los valores sin radiación.

De acuerdo a estos resultados de los parámetros mecánicos se puede indicar que la piel se vuelve más rígida reduciendo su elasticidad, lo que podría indicar que existió algún envejecimiento, decremento en la humedad y/o posibles alteraciones internas en el tejido.

CONCLUSIONES

El análisis de las muestras con y sin radiación demuestra que la interferometría holográfica digital con tres iluminaciones secuenciales es un método aplicable y amigable para la detección de la deformación de la superficie de la muestra mediante un sistema óptico. Este método permite obtener el desplazamiento en tres direcciones ($\boldsymbol{dx}$, $\boldsymbol{dy}$ y $\boldsymbol{dz}$,) y caracterizar las propiedades biomecánicas de los tejidos. A partir de los desplazamientos se calcularon los campos de deformación, el módulo de Young y la rigidez de una muestra biológica. La ventaja de esta técnica radica en que permite un examen completo del campo y proporciona más datos en cada punto de la imagen.

Dependiendo de la naturaleza y la ubicación del tejido, los valores de los parámetros mecánicos pueden variar. Fue notorio que los parámetros cambiaron en la muestra en respuesta a la radiación ultravioleta aplicada, lo que se evidenció en una disminución de la elasticidad y, consecuentemente, en un aumento de la rigidez. Concluyendo que este estudio permite diferenciar la afectación de la radiación UV.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Svobodová y J. Vostálová, “Solar radiation induced skin damage: Review of protective and preventive options”, International Journal of Radiation Biology, Vol. 86, 12, 2010, pp. 999-1030.
2. C. Sordo y C. Gutiérrez, “Cáncer de piel y radiación solar: experiencia peruana en la prevención y detección temprana del cáncer de piel y melanoma”, Rev Peru Med Exp Salud Publica, Vol 30, 1, 2013, pp. 113-117.
3. M. Ichihashi, M. Ueda, A. Budiyanto, T. Bito, M. Oka, M. Fukunaga, K. Tsuru, T. Horikawa, “UV-induced skin damage”, Toxicology, Vol. 189, 2003, pp. 21-39.
4. Y. Matsumura y H. N. Ananthaswamy, “Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin”, Toxicology and Applied Pharmacology, Vol. 195, 3, 2004, pp.298-308.
5. A. Kalra, A. Lowe, y AM. Al-Jumaily, “Mechanical Behaviour of Skin: A Review”, Journal of Material Science & Engineering, vol. 5, 4, 2016, pp. 1-7.
6. S. Gallagher, K. Josyula, Rahul, U. Kruger, A. Gong, A. Song, E. Eschelbach, D. Crawford, T. Pham, R. Sweet, C. Parsey, J. Norfleet, y S. De, “Mechanical behavior of full-thickness burn human skin is rate-independent”, Sci Rep., Vol. 14, 2024.
7. A. N. Annaidh, K. Bruyère, M. Destrade, M. D. Gilchrist, y M. Otténio, “Characterization of the anisotropic mechanical properties of excised human skin”, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 5, 1, 2012, pp. 139-148.
8. G. Frausto-Rea, M. D. S. Hernández-Montes, F. M. Santoyo, N. A. Ochoa, & E. E. L. Hernández, Assessment of ultraviolet radiation impact on human skin tissue using double-exposure digital holographic interferometry. Journal of Biomedical Optics, Vol. 30, 2, 2025, pp. 025001-1 - 025001-17.
9. D. J. Birmingham, E. Weiderpass, T. Partanen y P. Boffetta, (1999). Enfermedades de la piel el cuerpo humano. En Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo (pp.1-21). J. M. Stellman,
10. L. Dormont, J.M. Bessière y A. Cohuet. Human Skin Volatiles: A Review. J. Chem. Ecol., 39, 2013, pp. 569–578. https://doi.org/10.1007/s10886-013-0286-z.
11. T. Moniz, S.A. Costa Lima y S. Reis. Human skin models: From healthy to disease-mimetic systems; characteristics and applications. British Journal of Pharmacology, 177(19), 2020, pp. 4314–4329. https://doi.org/10.1111/bph.15184.
12. I. Gonçalves Ferreira, M. Blessmann Weber y R. Rangel Bonamigo. History of dermatology: the study of skin diseases over the centuries. Anais Brasileiros de Dermatologia, 96(3), 2021, pp. 332-345. https://doi.org/10.1016/j.abd.2020.09.006.
13. C. Edwards y R. Marks. Evaluation of biomechanical properties of Human Skin. Clinics in Dermatology, 13, 1995, pp.375-380.
14. M. Held, A. Rahmanian-Schwarz, J. Rothenberger, J. Schiefer, B. Janghorban Esfahani, H.E. Schaller y P. Jaminet. Alteration of biomechanical properties of burned skin. Burns, 41(4), 2015, pp. 789-795.
15. M.D.S. Hernández-Montes, G. Frausto-Rea, F. Mendoza Santoyo y E.E. Lozada Hernández. Determination of biomechanical parameters of human skin using 3D digital holographic interferometry, Optics and Lasers in Engineering, 196, 2026, 109418, pp. 1-13,
16. K. Rosicka, B. Mierzejewska-Krzyżowska y W. Mrówczyński. Skin biomechanical and viscoelastic properties measured with MyotonPRO in different areas of human body. Skin Res Technol., 28, 2022, pp. 236–245. https://doi.org/10.1111/srt.13116.
17. A.B. Cua, K.P. Wilhelm y H.I. Maibach. Elastic properties of human skin: relation to age, sex, and anatomical region. Arch Dermatol Res0 282, 1990, pp. 283–288. https://doi.org/10.1007/BF00375720.
18. N. Alwahaibi N y M. Alwahaibi. Mini review on skin biopsy: traditional and modern techniques. Front. Med. 12, 2025, pp. 1-9. https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1476685.

19. P.C. Alguire y B.M. Mathes. Skin biopsy techniques for the internist. Journal of General Internal Medicine, 13, 1998, pp. 46–54. https://doi.org/10.1046/j.1525-1497.1998.00009.x.
20. S. Kehl, C. Mechler, S. Menton, C. Weiss, S. Wasgindt, M. Sütterlin y M. Trunk. Touch Imprint Cytology of Core Needle Biopsy Specimens for the Breast and Quick Stain Procedure for Immediate Diagnosis. Anticancer Research, 34(1), 2014, pp. 153-157.
21. C. Pailler-Mattei, S. Bec y H. Zahouani. In vivo measurements of the elastic mechanical properties of human skin by indentation tests. Medical Engineering & Physics, 30(5), 2007, pp. 599. DOI 10.1016/j.medengphy.2007.06.011.
22. V. Narayanamurth, P. Padmapriya, A. Noorasafrin, B. Pooja, K. Hema, A. Y. Firus Khan, K. Nithyakalyani y F. Samsuri. Skin cancer detection using non-invasive techniques. RSC Adv, 8, 2018, pp. 28095-28130. DOI: 10.1039/C8RA04164D.
23. T. Gambichler, G. Moussa, M. Sand, D. Sand, P. Altmeyer y K. Hoffmann. Applications of optical coherence tomography in dermatology. Journal of Dermatological Science, 40(2), 2005, pp. 85-94. https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2005.07.006.
24. J.K. Barton, K.W. Gossage, W. Xu, J. R. Ranger-Moore, K. Saboda, C.A. Brooks, L. D. Duckett, S.J. Salasche, J.A. Warneke, y D.S. Alberts. Investigating Sun-damaged Skin and Actinic Keratosis with Optical Coherence Tomography: A Pilot Study. Technology in Cancer Research & Treatment, 2(6), 2003, pp. 525-535. doi:10.1177/153303460300200605.
25. M. Ambroziak, P. Pietruski, B. Noszczyk, y Ł. Paluch. Ultrasonographic elastography in the evaluation of normal and pathological skin – a review. Advances in Dermatology and Allergology/Postępy Dermatologii i Alergologii, 36(6), 2019, pp. 667-672. https://doi.org/10.5114/ada.2018.77069.
26. H.M. DeJong, S. Abbott, M. Zelesco, B.F. Kennedy, M.R. Ziman y F.M. Wood. The validity and reliability of using ultrasound elastography to measure cutaneous stiffness, a systematic review. Int J Burns Trauma. 7(7), 2017, pp. 124-141.
27. Y. Yang, L. Wang, F. Yan, X. Xiang, Y. Tang, L. Zhang, J. Liu, y L. Qiu. Determination of Normal Skin Elasticity by Using Real-time Shear Wave Elastography. J Ultrasound Med, 37, 2018, pp. 2507-2516. https://doi.org/10.1002/jum.14608.
28. R. Hesselstrand, J. Carlestam, M. Wildt, G. Sandqvist y K. Andréasson. High frequency ultrasound of skin involvement in systemic sclerosis – a follow-up study. Arthritis Res Ther 17(329), 2015, pp. 1-6. https://doi.org/10.1186/s13075-015-0853-5.
29. P. Calzavara-Pinton, C. Longo, M. Venturini, R. Sala y G. Pellacani. Reflectance Confocal Microscopy for In Vivo Skin Imaging†. Photochemistry and Photobiology, 84, 2008, pp. 1421-1430. https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00443.x.
30. E.A. Csuka, S.C. Ward, C. Ekelem, D.A. Csuka, M. Ardigò, y N.A Mesinkovska. Reflectance Confocal Microscopy, Optical Coherence Tomography, and Multiphoton Microscopy in Inflammatory Skin Disease Diagnosis. Lasers Surg Med, 53, 2021, pp. 776-797. https://doi.org/10.1002/lsm.23386.
31. G. Pellacani, P. Pepe, A. Casari, C. Longo. Reflectance confocal microscopy as a second‐level examination in skin oncology improves diagnostic accuracy and saves unnecessary excisions: a longitudinal prospective study, British Journal of Dermatology, 171(5), 2014, pp. 1044–1051, https://doi.org/10.1111/bjd.13148.
32. J. Welzel, Optical coherence tomography in dermatology: a review. Skin Research and Technology, 7, 2001, pp. 1-9. https://doi.org/10.1034/j.1600-0846.2001.007001001.x.
33. M. Mogensen, L. Thrane, T.M. Joergensen, P.E. Andersen, G.B.E. Jemec. Optical Coherence Tomography for Imaging of Skin and Skin Diseases. Annals of Clinical Psychiatry.;28(3), 2016, pp. 196-202. doi:10.1177/104012371602800309.
34. J.L. Silva Acosta, F. Mendoza Santoyo, J.M. Flores Moreno, M.D.S. Hernández Montes, M.H. De la Torre Ibarra, G. Frausto R., S. Muñoz S. y E.E. Lozada Hernández. Study of skin aging effects induced by near UV radiation using time average digital holographic interferometry. Optics and Lasers in Engineering, 137, 2021, 106345. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106345.
35. J.L. Silva Acosta, M.D.S. Hernández Montes, F. Mendoza Santoyo, M.H. De la Torre Ibarra, J.M. Flores Moreno, G. Frausto R., S. Muñoz S. Study of skin rigidity variations due to UV radiation using digital holographic interferometry. Optics and Lasers in Engineering, 126, 2020, 105909. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105909.

36. M. Takeda, H. Ina, y S. Kobayashi. “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” J. Opt. Soc. Am. 72 (1), 156-160, (1982).

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR ELÉCTRICO POR SIMULACIÓN DE FLUIDOS Y ALGORITMOS DEEP LEARNING DE FÍSICA INFORMADA

Jennifer Pamela Flores Piña [1], Aimee Zuzethe Ramírez Gómez [1], Juan de Anda Suarez [1], José Luis López Ramírez[1,2] y Daniel Jiménez Mendoza [1]

[1]Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincon, [2] Universidad Dolores Hidalgo
juan.ds@purisima.tecnm.mx

RESUMEN

Se presenta un desarrollo tecnológico de un aerogenerador sin aspas optimizado mediante Inteligencia Artificial (IA) de Física de mecánica de fluidos informada (Lattice Boltzmann). En la actualidad, se debe minimizar la dependencia de combustibles fósiles para el 2030, conocido como el punto de no retorno. Siendo los aerogeneradores tecnologías que pueden sustentar la demanda energética de ciudades de nivel medio (1,000,000 de personas); sin embargo, los aerogeneradores dependen de aspas que producen torque en el generador, lo que implica una demanda superficial considerable en las zonas cercanas a las ciudades. En otra perspectiva, los aerogeneradores con aspas son colocados en parques que utilizan las corrientes del aire compartidas con las aves migratorias, las cuales son afectadas en sus rutas migratorias. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan la inclusión social y de la biodiversidad. El proyecto consiste en desarrollar un generador eólico sin aspas que pueda maximizar la producción de energía eléctrica en entornos urbanos, donde los flujos de masa de aire son reducidos o existen turbulencias por el contacto con otros objetos. Para ello, se utilizan técnicas de exploración de espacio latente por Inteligencia Artificial, particularmente, Física informada Deep Learning. La IA determina la geometría estructural del aerogenerador optimizando la producción de energía eléctrica en sectores urbanos. Finalmente, el diseño de aerogenerador es manufacturado para pruebas de laboratorio en túnel de viento y pruebas de campo.

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía eléctrica en los sectores urbanos y agrícolas implican retos importantes en el área de la eficiencia energética debido a su disparidad de necesidades. Con base en las investigaciones encuentran resultados diferenciadores entre el consumo urbano y agrícola: en el sector urbano se demuestra un crecimiento proporcional a la demanda industrial y de consumo social; en el sector rural, el enfoque cambia porque las necesidades recaen la ganadería y la agricultura principalmente en el regadío y controles de ambiente en los invernaderos. En consecuencia, la energía eléctrica urbana y agrícola presenta desafíos para integrar elementos de eficiencia energética que limiten o erradiquen el impacto al medio ambiente (Nie et al., 2024; Yoshida et al., 2020).

Para minimizar el impacto ambiental del consumo eléctrico, implica explorar diferentes alternativas de producción de energías verde o reciclar deshechos energéticos de los procesos industriales. En la actualidad, existen diferentes alternativas para la producción de electricidad tales como fotovoltaica, eólica, biomasa e hidroeléctrica, las cuales producen energía eléctrica en diferentes enfoques de potencia eléctrica. Sin embargo, cada tipo de sistema implica diferentes necesidades tanto económicas como de recursos superficiales y del medio ambiente. En consecuencia, el uso de sistemas de energías verdes deben ser medidas con indicadores del Ciclo de Vida (CV) y Costos Ambientales (CA) para tomar decisiones que resultan en soluciones que no generen enfoques de doble moral (Aridi et al., 2025; Guidi et al., 2023).

Existe en la actualidad una emergencia latente debido a la dependencia de combustibles fósiles en el siglo pasado y al actual. Dicha crisis global ha encarecido los precios del gas natural y los precios de electricidad por la demanda urbana-industrial y agrícola; la crisis energética en este momento

puede ser comparada con la problemática presentada en 1970, debido a la alta demanda del petróleo. La crisis energética ha impulsado explorar tecnologías que permitan sustentar el déficit de electricidad con sistemas de energía renovables. Es de vital importancia resaltar que el reto de producción de energía verde debe ser impulsado para el 2030, o estaremos en un puto de no retorno para mitigar el cambio climático. Pero ¿Qué acciones son fundamentales para detener la dependencia de combustibles fósiles? la respuesta está en introducir y innovar en tecnologías de cosecha verde en los sectores urbano-industrial (Gajdzik et al., 2024; Wang & Azam, 2024) .

Las tecnologías verdes y el reúso de la energía residual industrial son la solución para frenar las emisiones de gases de efecto invernadero. En el estado de la técnica de generación verde existen diferentes alternativas. En el mercado, los paneles solares son una de las tecnologías más difundidas por su versatilidad y adaptabilidad a los diferentes entornos, siendo su cubertura hasta en espacio exterior. Sin embargo, la eficiencia de los paneles solares es limitada (25 %, aproximadamente), y para cubrir la demanda de potencia eléctrica es limitada, debido que necesita granjas de varias hectáreas, lo que limita su aplicabilidad en entornos urbanos; por otro lado, una mejor alternativa para la producción eléctrica de potencia recae en los generadores eólicos, lo cuales dependen del flujo de aire, donde los torques producidos en las aspas pueden mover mayores cargas de inducción eléctrica (Erdoğdu et al., 2025; Rodrígues et al., 2023) .

Antecedentes

La energía eólica es una tecnología que en las últimas décadas ha presentado un mayor impulso en la producción energética, debido a su potencial para la generación de electricidad de potencia. Uno de los principales elementos diferenciadores radica en las aspas aerodinámicas, las cuales permiten producir torques al girar un rotor que induce corriente eléctrica. En comparación con el panel solar puede aprovechar las corrientes dinámicas del flujo aire del planeta, produciendo así una mayor eficiencia. No obstante, los generadores eólicos dependen de las corrientes de aire que en algunas regiones del planeta pueden ser limitadas. En consecuencia, la investigación ha demostrado que el uso de capuchones aerodinámicos puede aumentar la eficiencia a un 68% en corrientes de aire de baja velocidad. Por lo tanto, la producción eólica es un enfoque prometedor debido a su adaptabilidad (Abdollahi et al., 2025; Firoozi et al., 2024).

En el sector urbano existen diferentes alternativas para integrar la energía eólica para sustentar la demanda eléctrica de los diferentes sectores socio-industriales. Un reto importa en el urbanismo-eólico es el análisis superficial limitado, la dinámica del fluido en contacto con edificaciones, las implicaciones arquitectónicas y de eficiencia al integrar sistemas eólicos en edificios, los flujos limitados de aire, así como los riesgos que presenta la rotación de las aspas. Por otro lado, las energías eólicas presentan también los retos de almacenamiento de energía, la cual debe ser distribuida en el entorno urbano. En consecuencia, la integración de los sistemas eólicos en sectores urbanos implica un estudio detallado de su implantación, ya que la producción de electricidad por flujo de aire debe mantenerse para mitigar las emisiones de efecto invernadero en el sector urbano (Firoozi et al., 2024; Kwok & Hu, 2023).

En el mercado y en la ciencia existen diferentes parques eólicos, todos ellos consisten en configurar aerogeneradores modulares interconectados en una red que alimenta directamente las subestaciones o es almacenadas en baterías. Un enfoque innovador radica en conectar los aerogeneradores a electrolizadores de membrana de intercambio de protones, el cual permite convertir la energía eléctrica en hidrógeno y agua. Las redes eólicas han demostrado en país de altos flujos de aire, por ejemplo, Suecia ha impulsado la producción de energía por medio de flujo de aire, en dicho país, se ha estimado que la potencia eléctrica suministrada ronda los 1 TW, teniendo en cuenta que una ciudad de un millón de habitantes requiere en promedio 1000 MW. En consecuencia, la energía eólica optimizada y distribuida con base a la eficiencia energética está facultada para suministrar energía a zonas urbanas (Dai et al., 2015; Wojtaszek et al., 2025).

El creciente uso de la energía eólica ha sustentado la producción eléctrica demandada; sin embargo, dichos sistemas han implicado afecciones en la sociedades y biodiversidad en los entornos que interactúan con los generadores eólicos. Un concepto latente es la creación de parques eólicos, la

mayoría de ellos se colocan en las regiones de mayor flujo de aire, siendo dichos parques las zonas de migración de la biodiversidad del planeta, principalmente aves, lo cual genera una doble moral. En otra perspectiva, la integración de parque eólicos en entornos urbanos produce problemas de seguridad para la navegación aérea y zonas de edificios cercanos a las aspas de rotación. He aquí, el problema de la integración de la energía eólica sin afección a la bio-diversidad y salvaguardar la seguridad de la sociedad en entornos urbanos (Jung, 2024; Nhien et al., 2024).

Una solución al problema de los generadores eólicos de aspa radica en el enfoque de tecnología que elimina las aspas. Los generadores eólicos sin aspas se impulsan en un principio físico de modos de vibración inducidos por vórtices de flujo en su estructura. Los aerogeneradores sin aspas prometen ser una alternativa sustentable en los entornos de corrientes de aire en zonas de migración, ya que las aves no se afectan por la rotación del aspa; por otro lado, en entornos urbanos un aerogenerador sin aspas, se pude adaptar a espacio reducidos en los entornos libres de plazas y caminos. Sin embargo, las zonas de entorno urbano presentan dificultades importantes como la turbulencia del flujo del air por colisión con los objetos y edificios en las ciudades, lo que dificulta la proliferación de generadores sin aspa. Por lo tanto, un reto para la investigación es construir un dispositivo que pueda adecuarse al entorno urbano con turbulencias presentes y flujos de fluido de baja velocidad, así como la optimización de bosque (redes) de generadores interconectados para subsanar la demanda eléctrica (Breen et al., 2025; González-González et al., 2024).

TEORÍA

Marco teórico

En el área de diseño asistido por computadora es de vital importancia debido a que permite la experimentación de diferentes tipos de sistemas electromecánicos. Su punto importante radica en reducir el consumo de materiales, herramientas, tiempo de laboratorio, y capital humano, el cual pueden contribuir a costos que superan las capacidades del proyecto. Por consiguiente, es de vital importancia construir un modelo de diseño asistido por simulación física para explorar el espacio latente de las posibles estructuras geométricas eólicas. A continuación, presentamos un esquema de marco teórico direccionado al diseño y manufactura de un dispositivo aerogeneración libre de aspa.

Partimos de las investigaciones fundamentales de modelos de vibración que un sistema mecánico sujeto a un punto fijo experimenta ante los cambios de deformación mecánica, particularmente, cuando al sistema se le ejerce un esfuerzo producido por un flujo que genera un vórtice y carga mecánica sobre el generador eólico. A partir de la carga mecánica, el sistema comienza a producir vibraciones, estas vibraciones presentan deformaciones en la estructura, la cual puede ser aprovechada para inducir corriente eléctrica.

Para producir simulaciones que se adecuen a la mecánica de fluidos existen diferentes enfoques, principalmente, los de libre malla o en la jerga de fluidos esquema Lagrangiano. En particular, nosotros trabajaremos con un tercer esquema, difundido en el estado del arte como simulación de partículas por sistemas de Boltzmann. En este enfoque, se considera el fluido como partículas de microestados, y se estudia su comportamiento en un estado macroscópico. La importancia de esquema de microestado radica en que el fluido es observado como un sistema de Boltzmann, las cuales interactuar con otras partículas del fluido o de elementos que están inmersos en el flujo. Por lo tanto, para estudiar los vórtices y las deformaciones mecánicas sobre el objeto sólido, utilizaremos el esquema de Boltzmann. En la figura 1, mostramos un ejemplo particular, donde se observa el comportamiento de los vórtices generados al estar en contacto con un objeto sólido. sa Para que las partículas del fluido interactúen con los elementos sólidos, utilizamos un enfoque de Immersed Boundary (IB), el cual considera que la geometría del sistema de perturbación se encuentra discretizada por puntos fijos en el espacio o en movimiento, los cuales se le llaman puntos de Lagrange. IB produce fuerzas que interactúan con las partículas del fluido. Para describir a detalle dicho enfoque, mostramos la Figura 2, un ejemplo, donde se demuestran los estados de vibración del fluido, en contacto con IB. Como resultado, se puede destacar que la turbulencia generada en el entorno del sistema produce movimientos de oscilación.

Como punto de partida de la simulación de mecánica de fluidos, consideramos una geometría circular, siendo la geometría más extendida en el estado del arte en el esquema de libre aspa. Resaltando, los factores tales como el ataque del flujo unidireccional, así como su producción de manufactura es simple. Para ilustrar con más detalle, en el documento de anexo, presentamos un vínculo que muestra un vídeo de simulación de un aerogenerador circular, donde puede observar los modos de vibración y su comportamiento de deformación ante los vórtices del flujo.

Impacto o beneficio

Impacto social

Desde el punto de vista social, contar con una cobertura de energía eléctrica verde atrae ahorro económico a los habitantes de una comunidad, así como progreso en sus actividades diarias. Sin embargo, generar estrategia de cobertura en toda la república mexicana conlleva a un reto de infraestructura. Es por ello que, nuestra propuesta genera un impacto social, debido a el uso de aerogeneradores optimizados sin aspa conjugadas con sistemas de almacenamiento de energía, generan autonomía de alumbrado con mantenimientos mínimos y así garantizar la cobertura de todo el territorio.

Impacto Ambiental

En un contexto ambiental, los aerogeneradores sin aspa resuelven la problemática de doble moral en la punción de energía verde; ya que se elimina la dependencia de las aspas, salvaguardando el entorno social y la biodiversidad. Por otro lado, los aerogeneradores din aspa producen un elemento de transición a un sistema de electricidad verde en entornos urbanos, derivado de la producción de electricidad limpia del y almacenada en energía potencial gravitacional. Por lo tanto, generamos un nuevo paradigma de sistemas sustentables.

Impacto Académico

En el área académica, el aerogenerador sin aspa produce un cuerpo de conocimiento que se difunde en diferentes productos académicos, principalmente en la formación de recursos humanos, ya que la transición a la generación de sistemas electromecánicos sustentables son elementos necesarios en el presente siglo XXI. Por otro lado, los resultados obtenidos de la presente investigación permiten generar elementos de propiedad intelectual; esto con base a la novedad de los aerogeneradores sin aspa, la cual está dirigida a los sistemas de alumbrado público de energías limpias.

METODOLOGÍA

El primer paso fundamental para la descripción del proyecto es construir un modelo teórico de diseño de simulación que permita estudiar el comportamiento de vibraciones en entornos simples como elementos circulares y elípticos. El experimento de control se muestra en la Figura 2, la cual describe un sistema de vibración en entorno de flujo de vórtice, cabe mencionar que, en el estado del arte, este tipo geometrías cilíndrica es las más utilizadas. Sin embargo, es necesario describir otro tipo de comportamiento, lo que plantea la hipótesis principal. ¿Es posible construir una geometría perturbada a la cilíndrica para construir un aerogenerador sin aspa y que mejore la producción de vibraciones mecánicas?

Para responder la pregunta planteada en la hipótesis, partimos de un sistema perturbativo de geometría base cilíndrica, para esto hacemos uso de los elementos de la física de primeros principios, la cual estiman que, dada una geometría simple, por ejemplo, un cilindro de radio r y altura h, el círculo de su proyección más una épsilon Lineal, cuadrática o cúbica, permiten describir nuevos enfoques geométricos. En consecuencia, hemos diseñado un experimento de comparación con una perturbación senoidal como se muestra en la Figura 1, dicha figura plantea la posibilidad de mejorar el modo de vibración del sistema a partir de cambios geométricos en la estructura del aerogenerador.

Con base a los experimentos mostrados en la Figura 2-6, observamos resultados de vibración mecánicas con respecto a la simulación de fluidos de Boltzmann, resaltando que, la vibración mecánica obtenida supera los resultados del experimento de control cilíndrico. Por lo tanto, el resultado corrobora la hipótesis planteada en nuestra investigación, las perturbaciones geométricas repercuten en las vibraciones de inducidas por los vórtices del fluido. En consecuencia, mayor producción mecánica tanto en deformación como de vibración genera mayor movimiento de las carcasas magnéticas o de los piezoeléctricos que inducen corriente.

Partiendo de los resultados experimentales presentados en la Figura 1, plantea la pregunta, si es posible encontrar un espacio latente para el diseño de nuevos aerogeneradores. En este contexto, existen diferentes alternativas como enfoque experimental. Sin embargo, seguiremos la línea de diseño de aerogeneradores utilizando simulación de mecánica de fluidos. En lo consiguiente, para investigar simulación de mecánica de fluidos, consideramos los métodos matemáticos y teóricos que permitan hacer un diseño experimental asistido por física de primeros principios enlazado a exploración de espacios latentes por inteligencia artificial.

El primer paso para el diseño asistido por inteligencia artificial de física informada es declarar qué tipo de inteligencia artificial vamos a utilizar; en el estado del arte, se ha utilizado enfoques como Deep Neural Networks, las cuales tienen la propiedad de adaptarse e investigar espacios latentes de N figuras geométricas que pueden ser conectadas a la simulación del fluido para producir vórtices. Sin embargo, los elementos como las redes neuronales necesitan una función de costes particular para reducir el error cuadrático medio. En consecuente, lo primero que tenemos que producir es un modelo matemático de física de primeros principios que pueda modelar el comportamiento teórico de una estructura mecánica en contacto de vórtices por contacto con fluidos y configura para que la red neuronal pueda operar.

Con base al modelo matemático de nodos de vibración mecánica, construiremos una función de costes (Eq. 1) que puede informar la física de vibración ideal objetivo a la red neuronal, los elementos que interactúan en la geometría del flujo simulado son optimizados por la técnica de Boltzmann, los cuales producen resultados de movimiento dinámico, estos movimientos dinámicos retroalimentan la red neuronal, lo que permite hacer una búsqueda del espacio latente experimental dentro de las posibles geometrías (Bahadur, I. 2022.).

$$L_{loss} = \left[m_2 \frac{d^2 S}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 x}{dt^2}\theta + m_2 g + k_2(s - l_0) - \alpha \dot{q}_c \right]^2 + \left[m_2 s \frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2m_2 \frac{ds}{dt}\frac{d\theta}{dt} + m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} - 2g\theta + \lambda \right]^2 \quad (1)$$

El resultado obtenido por la red neuronal debe de ser optimizada por un enfoque que garantice la convergencia a soluciones coherentes y estables de la física, Es por ello que, introducimos el uso de Boltzmann-Metaheurístico (de Anda-Suárez et al., 2022), el cual es una herramienta que garantiza la probabilidad de converger a la mejor solución posible. Por lo tanto. las simulaciones dirigidas por el esquema de Boltzmann encuentran geometrías perturbarías de aerogenerador sin aspas, que puedan maximizar la producción de movimiento dinámico y de deformación, induciendo así mayor corriente eléctrica.

Con base a los resultados experimentales de diseño, planteamos la manufactura un generador eólico sin aspas optimizado que pueda tener respuestas de movimiento mecánico y deformación ante diferentes escenarios: Un objetivo considera que el aerogenerador responda a flujos de baja velocidad, que probablemente produzcan vórtices limitados; otro experimento recae en los diseños simulados de aerogeneradores que cuenten con turbulencias procedente del entorno urbano, el cual puede estar en contacto con edificios, árboles y otros objetos que se encuentran en el sector, entonces el diseño tendría adaptabilidad a las necesidades de la ciudades verdes.

Finalmente, los resultados obtenidos en la investigación de diseño de aerogeneradores sin aspas dirigido a entornos de bajo flujo de aire, así como para turbulencias procedentes de objetos en los entornos urbanos. Por otro lado, el aerogenerador optimizado será llevados a validación en túneles de viento para garantizar el comportamiento en un entorno experimental controlado, así coma la validación de los alcances de generación eléctrica. Por otro lado, los resultados de óptimo local, además de los resultados de óptimo globales encontrados, serán reportados en un catálogo para posterior uso en otras investigaciones que puedan aumentar el estado del arte, posteriormente escalar el producto a desarrollos urbanos industriales.

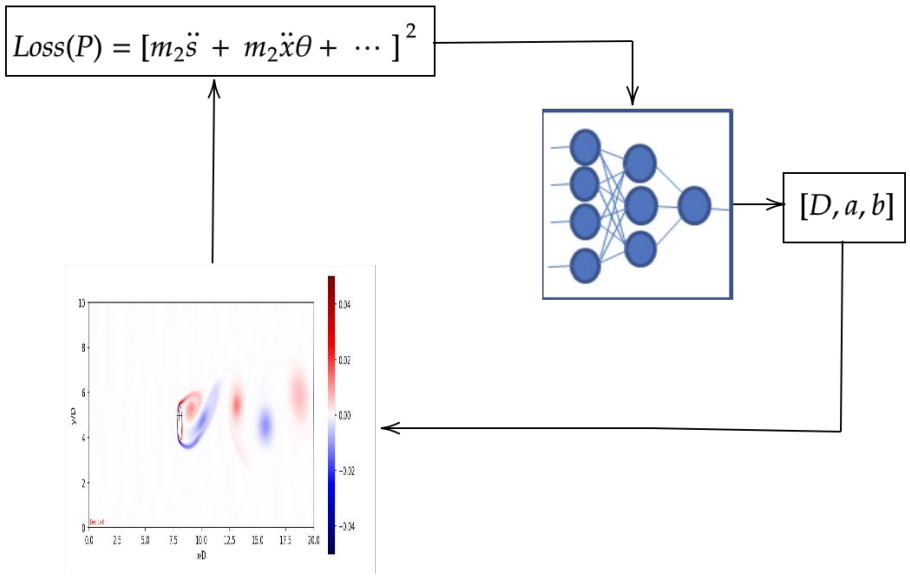


Figura 1. Diagrama general de la metodología de exploración de espacio latente de parámetros de diseño de aerogenerador sin aspa.

PARTE EXPERIMENTAL

Para el proceso experimental, hemos diseñado un conjunto de 5 experimentos para determinar si la técnica de física informada puede captura un diseño de elipse para detectar que estructura permite maximizar las vibraciones del Aero generador sin aspas. El diseño experimental fue construido a partir de la metodología de simulación de Lattice Boltzmann y Immersed Boundary en una estructura de coordenadas elípticas, en la cual el objetivo es determinar los parámetros que amplifican los modos de vibración del aero-generador sin aspas. Para la optimización de la estructura, se utilizó una red neuronal totalmente conectada conjugada con el algoritmo adam. En referencia a los cálculos de los parámetros de la estructura, se utiliza la técnica de física informada, la cual se enfoca en encontrar el estado de las ecuaciones diferenciales del sistema. Para la simulación del fluido, utilizamos una procesador i9, y una tarjeta GPU Rtx A6000.

RESULTADOS

En el proceso experimental, presentamos los cinco resultados estables que fueron encontrados por la optimización de parámetros de la red neuronal, la configuración de búsqueda aleatoria fue un Diámetro (D) en el dominio de 20 a 70 cm, para el semi eje mayor el rango fue de $\mathbf{0.01} \times \boldsymbol{D}$ a $\mathbf{1.0} \times \boldsymbol{D}$, en el caso del semi eje menor, utilizamos $\mathbf{0.01} \times \boldsymbol{D}$ a $\mathbf{1.0} \times \boldsymbol{D}$, la amplitud máxima de vibración fue de 80 cm. En las siguientes secciones, presentamos en las Figuras. 2-6 los resultados experimentales. Particularmente, tres estados de vibración, que está dividido en la condición inicial, estado intermedio y final. Para ilustrar los resultados de los parámetros de la estructura elíptica, se

reportan los parámetros en las Tablas 1-5 separando los resultados en diámetro estructural, semieje mayor y semieje menor. Finalmente, en las Figuras 2-6 en la esquina inferior derecha, se muestran los resultados de amplitud y su tendencia en la serie de tiempo de la simulación.

Experimento 1

En la presente sección describimos los resultados experimentales del experimento 1, en la Figura 1, se ejemplifican los estados del aero-generado sin aspa. En particular, con base en los parámetros de la Tabla. 1, la elipse cuenta con un diámetro de 60 cm, de ellos el eje dominante recae en y, lo que la elipse aumenta la superficie de contacto con el fluido. Teniendo en cuenta los tres estados (Figura. 2), se observa que la turbulencia aumenta gradualmente con respecto al tiempo de simulación. Desde una perspectiva de análisis de vibración, en la Figura 1 en la esquina inferior izquierda, muestra una estabilidad de vibración del sistema hasta la mitad de la simulación; posteriormente el aerogenerador comienza a aumentar la amplitud de resonancia. En conclusión, el sistema encontrado en la Figura 2 con parámetros de la Tabla 1, presenta elementos apropiado para maximizar la deflexión y aumentar la posibilidad de generar una mayor cantidad de corriente eléctrica con respecto a el sistema cilíndrico del estado del art.

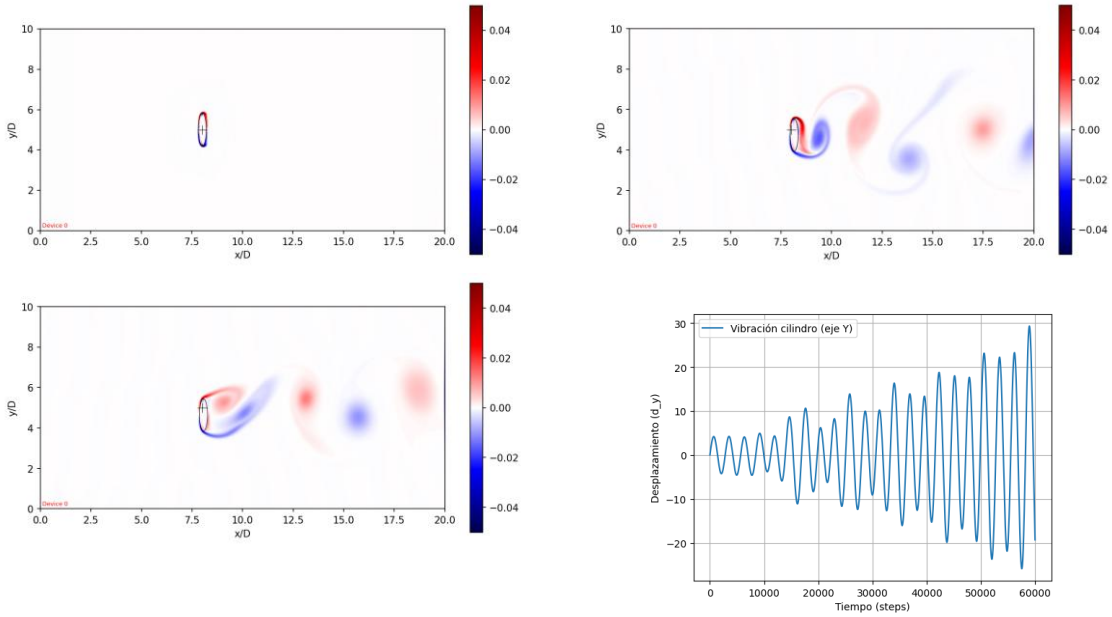


Figura 2. Resultados experimentales respecto a los parámetros de la Tabla. 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño de aerogenerador para el experimento 1.

Parámetros	Valor
Diámetro del Cilindro (D)	60 cm
Semi eje mayor	0.2xD
Semi eje menor	0.8xD

Experimento 2

En el experimento, se observa a partir de los resultados de los parámetros de la Tabla 2. que la configuración de los semieje mayor y menor son similares, lo que implica que la estructura del aerogenerador sea muy cercana a la cilíndrica, la cual ha sido estudiada en el estado del arte. Una particularidad de la Figura 3, indica que la turbulencia se mantiene mínima durante el total de tiempo de la simulación. En un sentido de vibración estructural, el aerogenerador de la Tabla 2 indica que

tiene la facultada para genera acilaciones; sin embargo, en comparación con los resultados del experimento su amplitud máxima de 7.5 cm está por debajo de la estructura de la Tabla 1. En resumen, la red neuronal determino parámetros estables, pero con limitaciones por cercanía de simetría en los ejes mayor y menor.

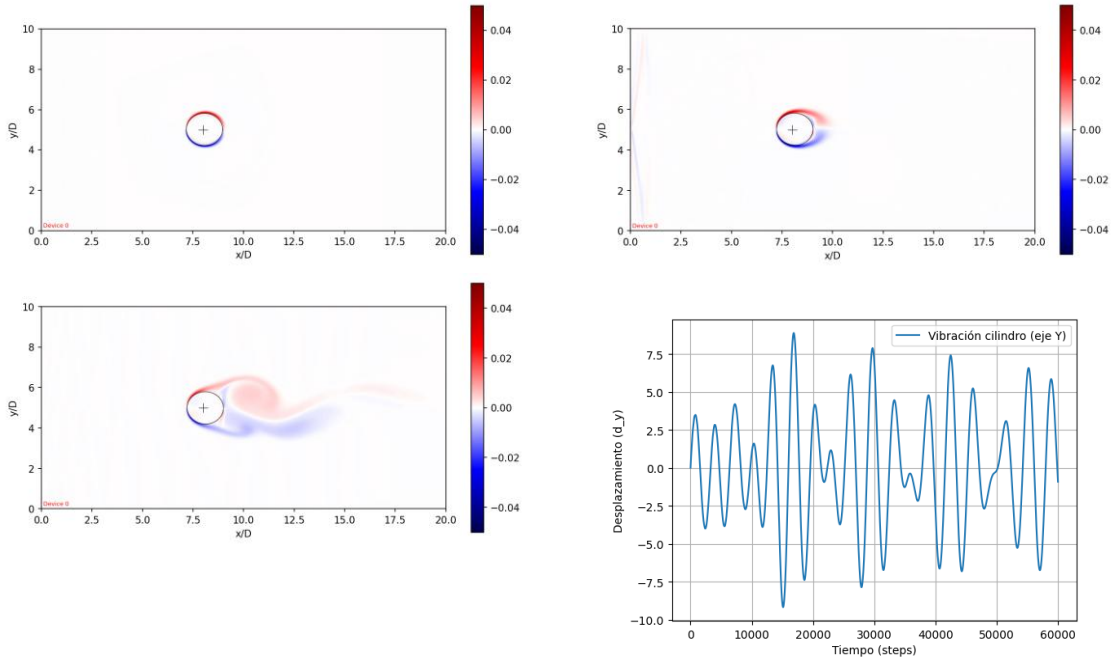


Figura 3. Resultados experimentales respecto a los parámetros de la Tabla. 2.

Tabla 2. Parámetros de diseño de aerogenerador para el experimento 2.

Parámetros	Valor
Diámetro del Cilindro (D)	60 cm
Semi eje mayor	0.9xD
Semi eje menor	0.8xD

Experimento 3

Con referencia a los resultados del experimento 3, en la Figura 4, se representan la simulación para los valores de la Tabla 3. En el presente resultado, destacamos el hecho de que el valor del semieje menor de la elipse es pequeño en relación con el semieje mayor, lo que implica que el aerogenerador es muy delgado en la dirección del flujo, dando como resultado en un sistema aerodinámico. Con base en la Figura. 4, en el contexto de la amplitud de oscilación, se observa que comienza con vibración en los estados inicial es e intermedio, pero rápido comienza a estabilizar su vibración llevándola al mínimo (cercana a cero) en los últimos instantes de la simulación. En resumen, el sistema presentado en la Tabla 3, indica que la red neuronal puede determinar parámetros estables con respecto a las vibraciones del sistema, sin embargo, ya en el contexto físico de producción de energía eléctrica, los resultados de la Tabla 3. no son viables para un aerogenerador.

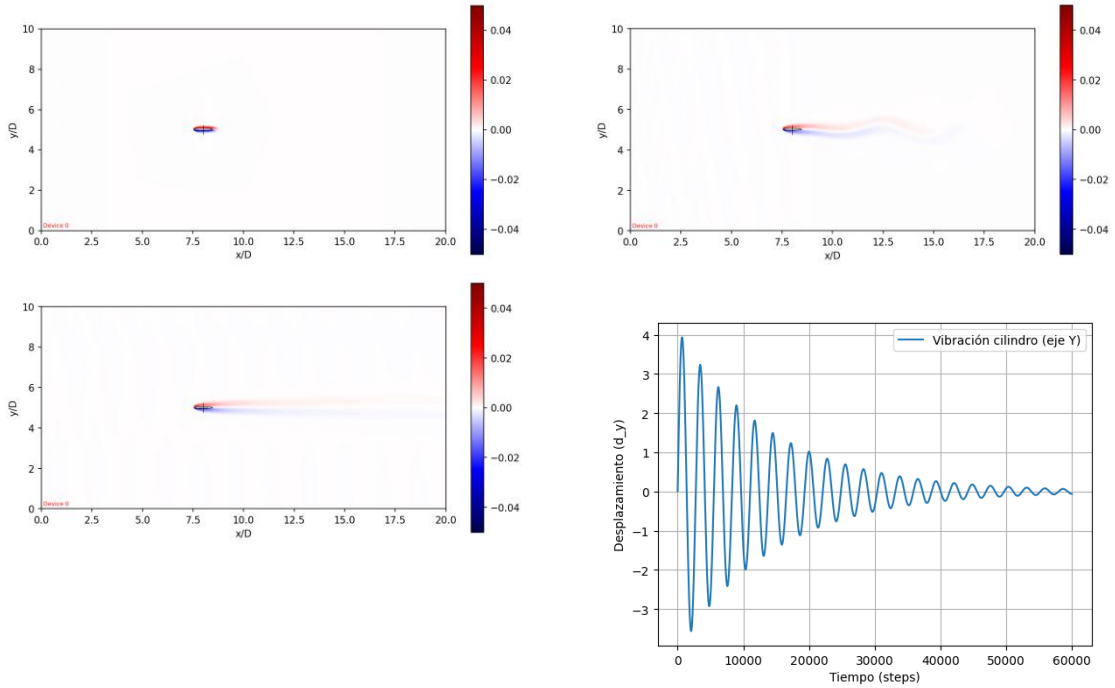


Figura 4. Resultados experimentales respecto a los parámetros de la Tabla. 3.

Tabla 3. Parámetros de diseño de aerogenerador para el experimento 3.

Parámetros	Valor
Diámetro del Cilindro (D)	45 cm
Semi eje mayor	0.45xD
Semi eje menor	0.05xD

Experimento 4

Para el caso del experimento 4, se observa en los resultados de la Tabla 4 que el eje menor de la elipse supera el valor de semieje mayor. En consecuencia, la aerodinámica del aerogenerador está en contra flujo del fluido, lo que implica que los resultados presentados en las tres figuras de simulación en Figura 5 generen perturbación en la estructura: en el estado inicial, el flujo impulsa a la estructura a salir del equilibrio moderado; en el estado intermedio, el sistema tiende aumentar el modo de vibración, sin embargo, por su forma estructural se detiene y llega a un punto de equilibrio mínimo; posterior al estado intermedio, la estructura hace un cambio similar a los estados anteriores, pero diferenciado por aumentar de manera exponencial las vibraciones del sistema hasta alcanzar su punto máximo muy similar al del experimento 1. El experimento 4 muestra evidencia de la importancia de la configuración de los parámetros del diámetro y sus semiejes mayor y menor, ya que tiene implicaciones directas en el comportamiento de la estructura, particular mete, en maximizar la producción de corriente eléctrica.

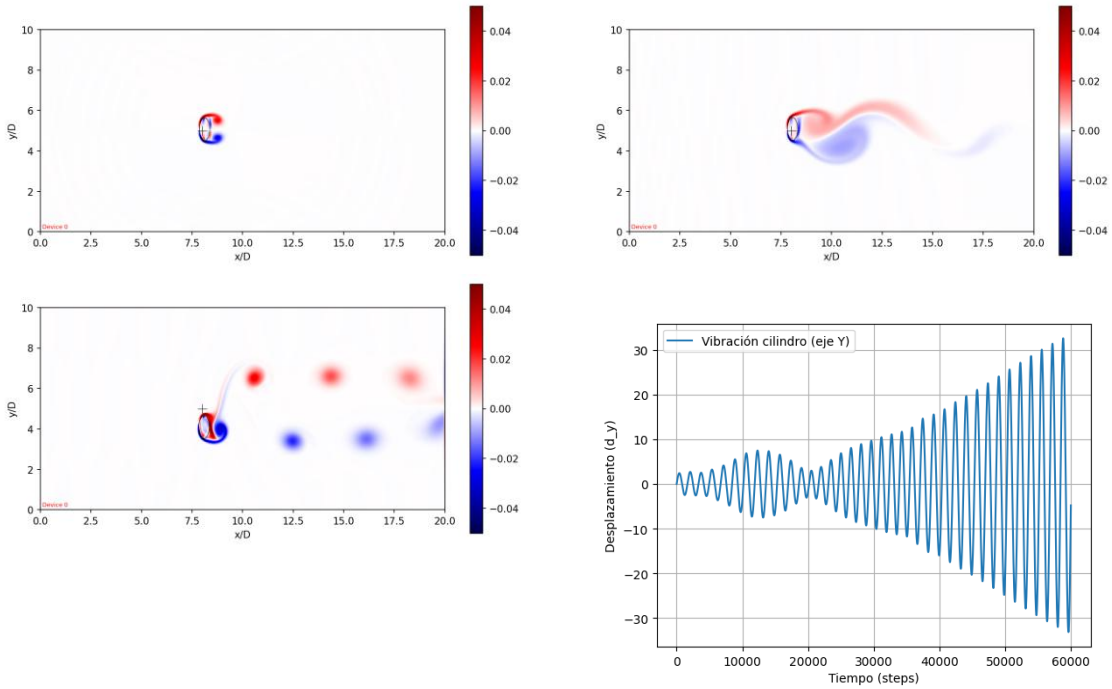


Figura 5. Resultados experimentales respecto a los parámetros de la Tabla. 4.

Tabla 4. Parámetros de diseño de aerogenerador para el experimento 4.

Parámetros	Valor
Diámetro del Cilindro (D)	45 cm
Semi eje mayor	0.258xD
Semi eje menor	0.57xD

Experimento 5

Para el ultimo experimento, se obtuvo el conjunto de parámetros de la Tabla 5. Al igual que los experimentos 1, 4, el semieje menor predomina sobre el mayor, lo que implica un aumento en el área superficial de ataque al fluido. Con base a las simulaciones de la Figura. 6, puntualizamos que la aerodinámica del sistema es más estable en los tres estados simulados, lo que implica una menor cantidad de turbulencias que generan cambios abruptos en el aerogenerador, por otro lado, el sistema muestra evidencia de contener el máximo de vibración mecánica de los cinco experimentos presentados en esta investigación. En resultado general, el diseño del aerogenerador de la Figura 6, Tabla 5 genera un sistema que amplifica las vibraciones del generador eléctrico, lo que implica generar una mayor cantidad de corriente eléctrica en el mismo tiempo si se contara con un aerogenerador cilíndrico.

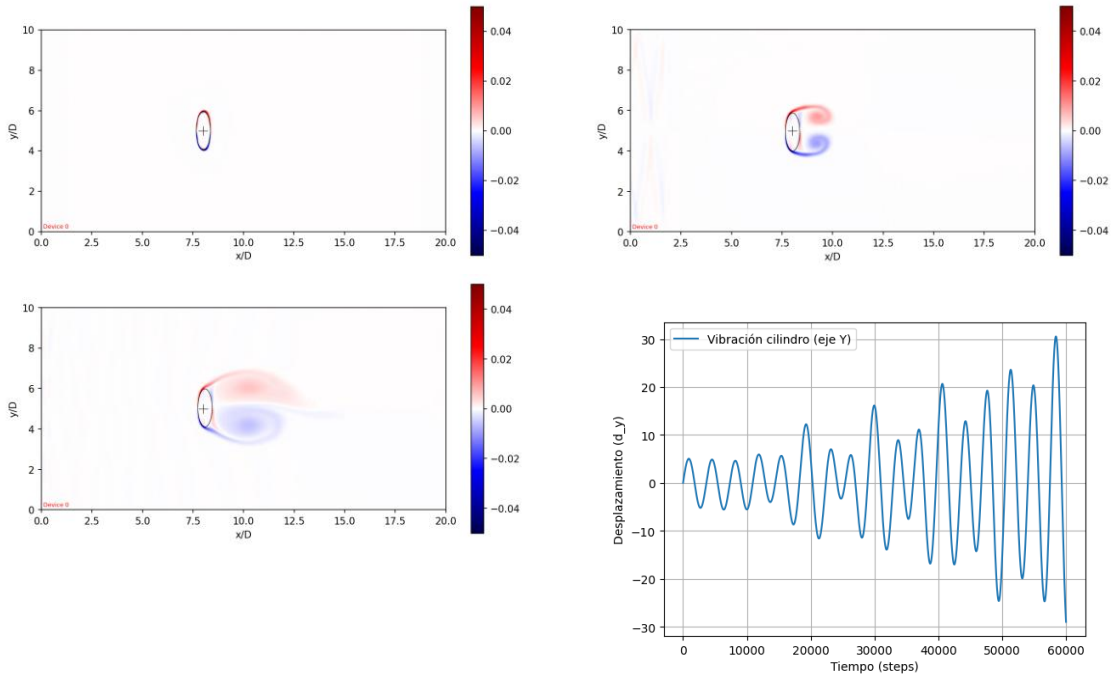


Figura 6. Resultados experimentales respecto a los parámetros de la Tabla. 5.

Tabla 5. Parámetros de diseño de aerogenerador para el experimento 5.

Parámetros	Valor
Diámetro del Cilindro (D)	75 cm
Semi eje mayor	0.351xD
Semi eje menor	0.94xD

CONCLUSIONES

En la presente investigación, se presentó el trabajo una metodología para el diseño de aerogeneradores sin aspa a partir de la técnica exploratoria de física informada Deep Learning y la optimización de los parámetros de una elipse, la cual estabilizó y exploro el algoritmo Adam. El objetivo principal fue el diseño de un aerogenerador sin aspas me maximice el número de oscilaciones estructurales, las cuales impacten en la producción de energía eléctrica pudiendo escalar su propuesta a redes de producción de corriente eléctrica en entornos de zonas rurales y urbanas. La propuesta del diseño determina una nueva tendencia en la generación eléctrica mediante corrientes de aire manteniendo la seguridad de los seres vivos que interactúan en el entorno del aerogenerador.

Un aporte de la investigación radica en demostrar de manera experimental que las variaciones de las geometrías de un aerogenerador sin aspas ante un flujo de aire tienen implicaciones en el resultado mecánico de modos de vibración del sistema, entonces es posible construir sistemas de generación eléctrica que maximice su producción. Por otro lado, se ha presentado una metodología para explorar el espacio de geometrías de aerogenerador sin aspas utilizando las técnicas de física informada Deep Learning y el algoritmo de optimización Adam, dando como resultado estructuras geométricas que aumentan la amplitud de vibración del sistema, lo que implica una mayor torción mecánica que puede ser aprovechada conectar en materiales piezoeléctrico que pueda cosechar más energía eléctrica.

En una perspectiva de trabajo futuro, se pretende utilizar los resultados del experimento 1,4 y 5 para implementar en pruebas físicas de laboratorio utilizando túnel de viento e instrumentación para determinar los modos de vibración y aplicar galgas piezoeléctricas que reaccionan a la deformación mecánica respondiendo con una corriente eléctrica. Por otro lado, se espera manufactura los diseños en escalas del estado el arte para comparar sus resultados en contacto con flujos de aire de diferentes velocidades, los cuales son variables en el transcurso del día y del año.

BIBLIOGRAFÍA

1. Nie, Y., Zhang, G., Zhong, L., Su, B., & Xi, X. (2024). Urban–rural disparities in household energy and electricity consumption under the influence of electricity price reform policies. Energy Policy, 184, 113868. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113868
2. Yoshida, A., Manomivibool, P., Tasaki, T., & Unroj, P. (2020). Qualitative Study on Electricity Consumption of Urban and Rural Households in Chiang Rai, Thailand, with a Focus on Ownership and Use of Air Conditioners. Sustainability, 12(14), 5796. https://doi.org/10.3390/su12145796
3. Aridi, R., Aridi, M., Pannier, M.-L., & Lemenand, T. (2025). Eco-environmental, and social impacts of producing electricity with various renewable energy sources. Energy, 320, 135139. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135139
4. Guidi, G., Violante, A. C., & De Iuliis, S. (2023). Environmental Impact of Electricity Generation Technologies : A Comparison between Conventional, Nuclear, and Renewable Technologies. Energies, 16(23), 7847. https://doi.org/10.3390/en16237847
5. Gajdzik, B., Wolniak, R., Nagaj, R., Žuromskaitė-Nagaj, B., & Grebski, W. W. (2024). The Influence of the Global Energy Crisis on Energy Efficiency: A Comprehensive Analysis. Energies, 17(4), 947. https://doi.org/10.3390/en17040947
6. Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. Geoscience Frontiers, 15(2), 101757. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757
7. Erdoğdu, A., Dayi, F., Yanik, A., Yildiz, F., & Ganji, F. (2025). Innovative Solutions for Combating Climate Change: Advancing Sustainable Energy and Consumption Practices for a Greener Future. Sustainability, 17(6), 2697. https://doi.org/10.3390/su17062697
8. Rodrigues, B. N., Molina Junior, V. E., & Canteras, F. B. (2023). Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil). Environmental Advances, 13, 100398. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100398
9. Abdollahi, S. A., Ranjbar, S. F., Jafarai, M., Ehghaghi, M. B., & Faramarzi, S. (2025). Enhancing wind energy efficiency: A study on the power output of shrouded wind turbines for a hydrogen storage system. Results in Engineering, 26, 104710. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104710
10. Firoozi, Ali Akbar, Hejazi, F., & Firoozi, Ali Asghar. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. Energies, 17(12), 2919. https://doi.org/10.3390/en17122919
11. Kwok, K. C. S., & Hu, G. (2023). Wind energy system for buildings in an urban environment. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 234, 105349. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105349
12. Dai, K., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W.-N., & Huang, Z. (2015). Environmental issues associated with wind energy – A review. Renewable Energy, 75, 911–921. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.074
13. Wojtaszek, H., Borowski, P. F., Handschke, M., Miciuła, I., Stecyk, A., Bielawa, A., Ozdyk, S., Kowalczyk, A., & Czepło, F. (2025). Wind Energy in Transition: Development, Socio-Economic Impacts, and Policy Challenges in Europe. Energies, 18(11), 2811. https://doi.org/10.3390/en18112811
14. Jung, C. (2024). Recent Development and Future Perspective of Wind Power Generation. Energies, 17(21), 5391. https://doi.org/10.3390/en17215391
15. Nhien, L. C., Behzadi, A., Assareh, E., Lee, M., & Sadrizadeh, S. (2024). A new approach to wind farm stabilization and peak electricity support using fuel cells: Case study in Swedish cities.

International Journal of Hydrogen Energy, 80, 22–38. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.101
16. Breen, J., Mallik, W., & Adhikari, S. (2025). Performance analysis and geometric optimization of bladeless wind turbines using wake oscillator model. Renewable Energy, 254, 123549. https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123549
17. González-González, E., Yáñez, D. J., Del Pozo, S., & Lagüela, S. (2024). Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations. Applied Sciences, 14(7), 2815. https://doi.org/10.3390/app14072815
18. Bahadur, I. (2022). Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine. *Energies*, *15*(18), 6773. https://doi.org/10.3390/en15186773.
19. de Anda-Suárez, J., Calzada-Ledesma, V., & Ortiz-Aguilar, L. (2022). Metaheuristic–Boltzmannian optimization model: A new methodology for convergence using the Jensen–Shannon metric in continuous optimization problems. Swarm and Evolutionary Computation, 75, 101193. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2022.101193

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ PARA ADQUISICIÓN Y RECONSTRUCCIÓN DE HOLOGRAMAS DIGITALES EN TIEMPO REAL

Jhoanna Granados Ruiz[1*], Paulina Alicia Irais Hernández Becerra[1], Birzabith Mendoza Novelo[2] y Jorge Mauricio Flores Moreno[1]

[1] Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Laboratorio Colaborativo de Microscopía Óptica,
[2] División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato.
*jhoannagr@cio.mx

RESUMEN

La implementación de sistemas de holografía digital en entornos experimentales exige no solo precisión óptica, sino también la integración eficiente entre adquisición de datos y el procesamiento numérico. En aplicaciones interferométricas que requieren el análisis cuantitativo de fase, la capacidad de reconstrucción inmediata del campo complejo resulta determinante para optimizar la alineación, el filtrado espectral y las condiciones experimentales. Con este objetivo, se desarrolló una plataforma computacional para la captura de hologramas en tiempo real y su reconstrucción numérica integrada, orientada a la experimentación interferométrica de alta sensibilidad. El sistema se implementó en un arreglo de tipo Mach-Zehnder para obtener hologramas por transmisión, y se configuró para el estudio de objetos transparentes y la detección de variaciones de fase asociadas a micro desplazamientos. El desarrollo se llevó a cabo en dos etapas: inicialmente en MATLAB, donde se estructuraron y validaron los algoritmos de reconstrucción basados en transformada de Fourier, filtrado espacial del orden de difracción y propagación mediante el método del espectro angular; posteriormente, la arquitectura fue migrada a Python con el propósito de consolidar una solución de código abierto que no dependiera de licencias propietarias y facilitara su implementación en distintos laboratorios. La interfaz integra el control de parámetros de adquisición (exposición, ganancia, frecuencia de captura), la visualización simultánea del holograma (considerando los parámetros de recosntrucción) y su espectro, la selección interactiva de la región espectral y la reconstrucción automática del campo complejo, generando mapas de amplitud y fase en tiempo real. Para evaluar el desempeño del sistema, se compararon los resultados obtenidos en ambas plataformas mediante el análisis de los mapas de fase y la estimación de desplazamientos micrométricos. Durante la operación continua, la reconstrucción y la visualización se realizaron con suficiente rapidez para permitir el monitoreo constante del experimento. Se observó que la implementación en Python mantuvo mayor estabilidad durante sesiones prolongadas, con menor tendencia a que la interfaz se volviera lenta al procesar y mostrar imágenes simultáneamente. En el caso de MATLAB, el desempeño fue igualmente funcional, aunque presentó mayor sensibilidad al manejar la adquisición y la visualización intensivas simultáneamente. En ambos entornos, el sistema permitió la actualización continua de la amplitud y la fase durante la captura, sin interrupciones significativas. La plataforma desarrollada constituye una herramienta experimental robusta para la holografía digital cuantitativa, al integrar en un entorno único el control instrumental y el procesamiento avanzado del campo óptico. La transición de un entorno propietario a uno de código abierto amplía la accesibilidad y la reproducibilidad del sistema, sin comprometer el rigor algorítmico ni el desempeño, y consolida una base tecnológica adaptable a diversas aplicaciones en metrología óptica interferométrica.

INTRODUCCIÓN

La holografía digital es una técnica interferométrica que permite registrar y reconstruir numéricamente la información de amplitud y fase de un frente de onda a partir de la interferencia entre un haz objeto y un haz de referencia **[1-3]**. En un sistema de holografía digital fuera de eje (como el mostrado en la **Figura 13**), la separación angular entre el haz objeto y el haz de referencia permite aislar los términos de interferencia en el dominio de Fourier **[4,5]**. Esta característica permite

seleccionar el orden difractado de interés, filtrar espacialmente el espectro y reconstruir el campo complejo mediante un procesamiento numérico. Para el análisis de pequeñas variaciones en el frente onda esto resulta muy útil ya que permite medir cambios de fase al reconstruirla.

Sin embargo, al realizar los experimentos, los resultados no dependen únicamente del arreglo o el algoritmo de reconstrucción. La adquisición de los hologramas, la visualización del patrón registrado, la selección del orden difractado, la reconstrucción numérica, la comparación contra la referencia y el guardado de datos forman parte de un mismo flujo de trabajo. Cuando todo esto se ejecutan en plataformas independientes, el procedimiento se fragmenta ya que los datos tienen que exportarse manualmente, los parámetros de adquisición y reconstrucción pueden perder consistencia entre sesiones y la retroalimentación sobre la calidad del holograma reconstruido ocurre de manera posterior a la captura.

El aporte principal del trabajo se encuentra en la integración computacional del procesamiento holográfico dentro de una interfaz operable durante la adquisición experimental. Para ello, se implementó una arquitectura con separación de tareas de adquisición, reconstrucción y almacenamiento, empleando procesamiento asíncrono, colas de reconstrucción y reutilización de términos de propagación. Esta estrategia permite reducir bloqueos durante la operación y conservar en un mismo entorno los parámetros ópticos, de adquisición y de reconstrucción.

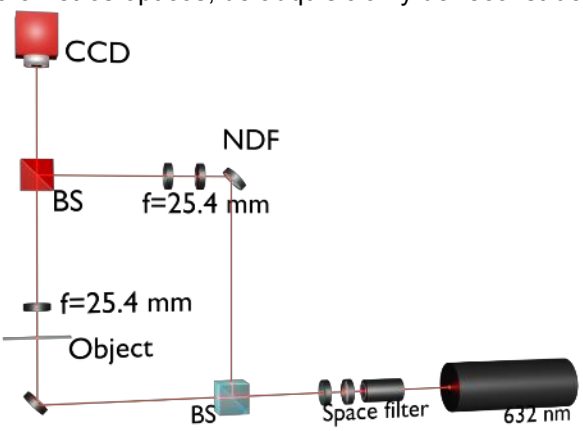


Figura 13 Arreglo experimental de holografía digital fuera de eje basado en una configuración tipo Mach-Zehnder. El haz objeto atraviesa la tarjeta USAF y, posteriormente, interfiere con el haz de referencia en el plano de la cámara.

La validación experimental se realizó utilizando un arreglo interferométrico tipo Mach-Zehnder fuera de eje, que consiste de un láser He-Ne de 632 nm, una cámara monocromática Allied Vision Mako U-503B y una tarjeta USAF colocada en el camino del haz objeto (**Figura 13**). La reconstrucción se efectuó mediante filtrado del orden difractado y propagación por el método de espectro angular, empleando una distancia de propagación de 25.5 mm. La evaluación se centró en la obtención de mapas de fase y diferencias de fase respecto a una referencia experimental, así como en la validación funcional de la interfaz como plataforma integrada de adquisición y procesamiento.

TEORÍA

En un holograma fuera de eje, la intensidad corresponde a la interferencia entre el campo objeto $\boldsymbol{O}(x,y)$ y el campo de referencia $\boldsymbol{R}(x,y)$. Esta intensidad puede expresarse como:

$$\boldsymbol{I}(x,y) = |\boldsymbol{O}(x,y) + \boldsymbol{R}(x,y)|^2 \qquad \mathbf{1}$$

Al expandir la ecuación anterior se obtiene:

$$\boldsymbol{I}(x,y) = |\boldsymbol{O}(x,y)|^2 + |\boldsymbol{R}(x,y)|^2 + \boldsymbol{O}(x,y)\boldsymbol{R}*(x,y) + \boldsymbol{O}*(x,y)\boldsymbol{R}(x,y) \qquad \mathbf{2}$$

donde los dos primeros términos corresponden a las intensidades individuales del objeto y de la referencia, mientras que los términos cruzados contienen la información de interferencia. En una configuración fuera de eje, estos términos cruzados se desplazan espacialmente en el dominio de Fourier, permitiendo aislar uno de los órdenes difractados mediante filtrado espectral.

Para poder aplicar el filtrado se aplica la transformada de Fourier al holograma registrado:

$$\boldsymbol{F(u,v) = \mathcal{F}\{I(x,y)\}} \quad \mathbf{3}$$

A partir de $\boldsymbol{F(u,v)}$, se selecciona el orden difractado de interés mediante una máscara espacial. El espectro filtrado se centra y posteriormente se aplica la transformada inversa de Fourier para recuperar el campo complejo en el plano inicial:

$$\boldsymbol{U_0(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\left(F_{filtrado}(u,v)\right)} \quad \mathbf{4}$$

Una vez obtenido el campo complejo $\boldsymbol{U_0(x,y)}$, la reconstrucción a una distancia $\boldsymbol{z}$ se realiza mediante el método del espectro angular. En este método, el campo recuperado se transforma al dominio de frecuencias espaciales, se multiplica por la función de transferencia de propagación y posteriormente se transforma nuevamente al dominio espacial **[7]**. La propagación puede expresarse como:

$$\boldsymbol{U(x,y;z) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[U_0(x,y)]H(f_x,f_y;z)\}} \quad \mathbf{5}$$

Donde:

$$\boldsymbol{H(fx,fy;z) = \exp\left(i2\pi z\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2}\right)} \quad \mathbf{6}$$

es la función de transferencia asociada a la propagación, $\boldsymbol{\lambda}$ es la longitud de onda y $\boldsymbol{f_x, f_y}$ son las frecuencias espaciales asociadas al campo reconstruido. En este trabajo se utilizó una distancia de propagación de z = 25.5 mm.

Una vez propagado el campo, la fase en el plano de reconstrucción se obtiene a partir del argumento del campo complejo:

$$\boldsymbol{\varphi(x,y) = \arg[U(x,y;z)]} \quad \mathbf{7}$$

En nuestro caso se utilizó el método de doble exposición, este consiste en la adquisición de dos hologramas, uno que funciona como referencia en el que no se coloca muestra y otro en el que se toma el holograma con la muestra que se quiere analizar. Los hologramas se procesan con el mismo procedimiento numérico. La diferencia de fase se calculó utilizando:

$$\boldsymbol{\Delta\varphi(x,y) = \varphi_{holo}(x,y) - \varphi_{ref}(x,y)} \quad \mathbf{8}$$

donde $\boldsymbol{\varphi_{holo}(x,y)}$ corresponde a la fase reconstruida del holograma con la tarjeta USAF y $\boldsymbol{\varphi_{ref}\,(x,y)}$ corresponde a la fase reconstruida de la referencia **[1-3]**. En la interfaz para optimizar tiempo de procesamiento se muestra únicamente la fase envuelta.

ARQUITECTURA DE PROCESAMIENTO

La interfaz fue planteada como una plataforma que permite la adquisición y procesamiento de hologramas digitales. Para esto se estructuró en módulos, cada uno independiente, lo que permite la adquisición, visualización, reconstrucción y guardado, lo que permite que operaciones de alto costo computacional, como la transformada de Fourier o el almacenamiento de imágenes, no genere bloqueos en la actualización de la cámara ni en la respuesta de la interfaz.

El flujo de datos inicia con la captura continua de cuadros desde la cámara. Cada cuadro adquirido puede enviarse a visualización, guardado o reconstrucción, dependiendo del modo de operación seleccionado por el usuario. Para la reconstrucción durante la adquisición, los cuadros se colocan en una cola de procesamiento de tamaño limitado. Esta decisión evita la acumulación de cuadros obsoletos y prioriza la reconstrucción del estado más reciente del sistema experimental.
La referencia experimental se reconstruye una sola vez con los parámetros ópticos correspondientes. A partir de esta reconstrucción se almacena la fase de referencia, que posteriormente se reutiliza para calcular la diferencia de fase de cada holograma procesado. Esto reduce carga computacional y asegura que la comparación entre holograma y referencia se realice bajo el mismo flujo numérico.

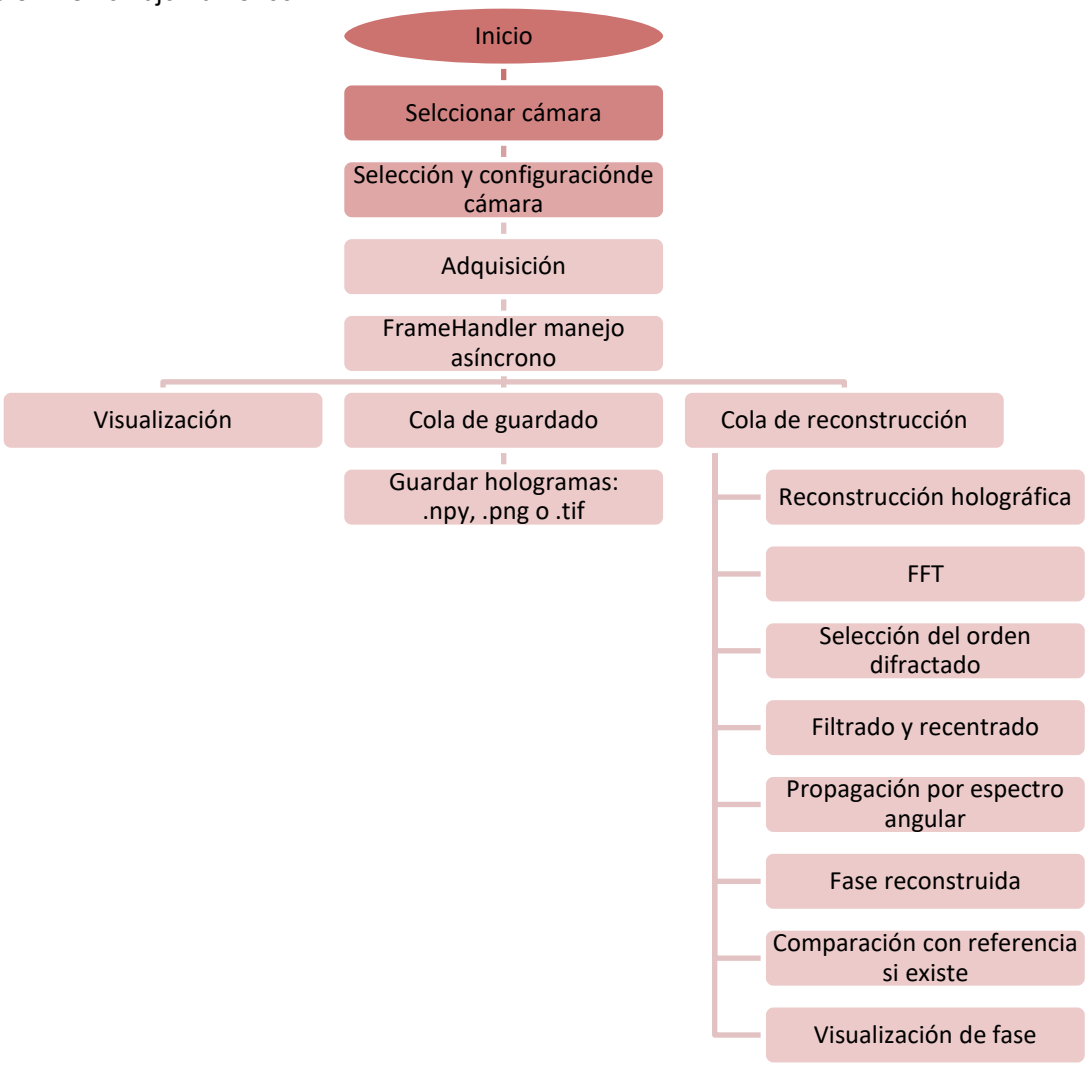


Figura 14 Arquitectura general de procesamiento de la interfaz. El flujo integra adquisición desde la cámara, visualización del holograma, cálculo de FFT, selección del orden difractado, reconstrucción, corrección con referencia, visualización de fase y guardado

El módulo de reconstrucción implementa las siguientes operaciones: conversión del holograma a arreglo numérico, transformada de Fourier bidimensional, selección automática o manual del orden difractado, filtrado con máscara circular, recentrado espectral, transformada inversa, propagación por espectro angular, extracción de fase y cálculo de diferencia de fase.

RESULTADOS

Para la validación del programa se utilizó una configuración experimental tipo Mach-Zehnder fuera de eje, con el objetivo de generar los hologramas, este se muestra en la **Figura 13**. Como fuente se utilizó un láser de helio-neón con $\boldsymbol{\lambda = 632\ nm}$.

Tabla 2 parámetros utilizados en la adquisición y reconstrucción de hologramas.

Parámetro	**Valor**
Fuente de iluminación	Láser He-Ne
Longitud de onda	632 nm
Configuración óptica	Mach-Zehnder fuera de eje
Tipo de registro	Holografía digital por transmisión
Objeto de prueba	Tarjeta USAF
Ubicación del objeto	Haz objeto
Cámara	Allied Vision Mako U-503B
Resolución del sensor	2592 × 1944 px
Tamaño de píxel	2.2 µm × 2.2 µm
Formato de adquisición	Mono12
Frecuencia de adquisición	14 fps
Distancia de propagación	25.5 mm
Método de reconstrucción	Filtrado de Fourier y espectro angular
Corrección de fase	Referencia experimental

Como muestra se utilizó una tarjeta USAF 1951, esto sirvió como prueba para validar la adquisición de hologramas, la reconstrucción del campo complejo y el cálculo de la diferencia de fase. El registro se realizó con una cámara monocromática Allied Vision Mako U-503B a resolución completa del sensor (2592x1944) u con una frecuencia de adquisición de 14 fps (fotogramas por segundo) **[6]**.

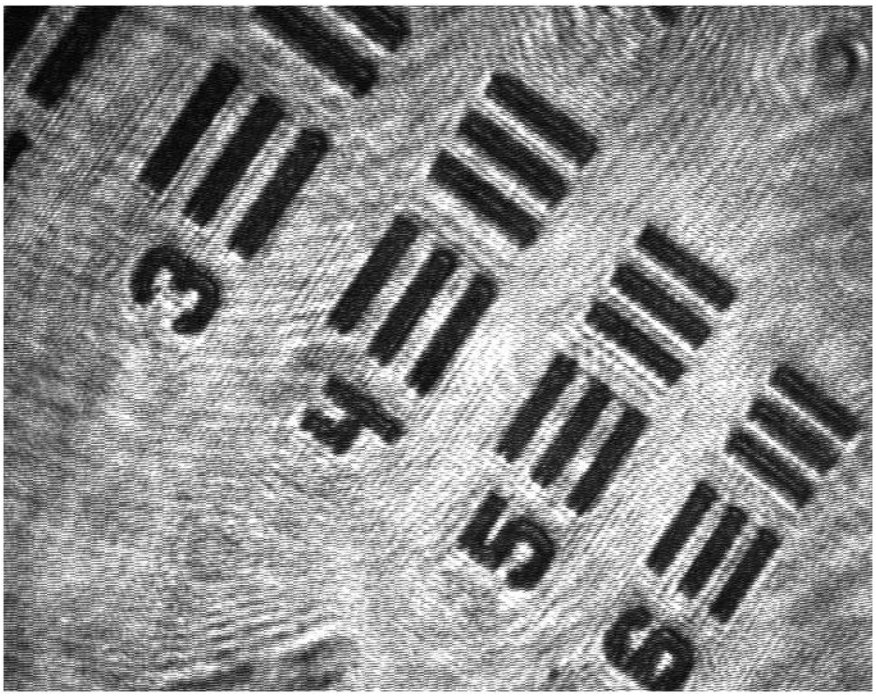


Figura 15 Holograma registrado experimentalmente con la tarjeta USAF colocada en el haz objeto.

La interfaz fue implementada en Python utilizando PyQt6 para la construcción de la interfaz gráfica y bibliotecas científicas como NumPy y SciPy para el procesamiento numérico. La comunicación con

la cámara se estructuró mediante backends, lo que permite separar la lógica general de la interfaz del método específico de conexión con el dispositivo. En la versión probada, el sistema considera compatibilidad con cámaras Allied Vision mediante Vimba o VmbPy.

El módulo de cámara permite detectar dispositivos disponibles, abrir la cámara seleccionada, configurar el modo de adquisición continua y controlar parámetros experimentales como exposición, ganancia, frecuencia de adquisición y formato de píxel. Esta integración es relevante porque conserva dentro de la misma plataforma tanto los parámetros de captura como los parámetros de reconstrucción.

El procesamiento de las imágenes adquiridas se gestionó mediante un módulo encargado de recibir los datos de la cámara y distribuirlos hacia las tareas de visualización, guardado o reconstrucción. Para evitar bloqueos, el guardado de imágenes y la reconstrucción numérica se ejecutaron en hilos independientes. El sistema utiliza una cola de guardado y una cola de reconstrucción; esta última tiene tamaño limitado para no permitir la acumulación de cuadros durante la operación en tiempo real.

Al llenarse la fila de reconstrucción, el sistema descarta cuadros anteriores y conserva el cuadro más reciente. Esta estrategia prioriza la actualización del estado experimental sobre el procesamiento de información atrasada, lo cual es adecuado para un sistema de monitoreo holográfico en cuasi tiempo real.

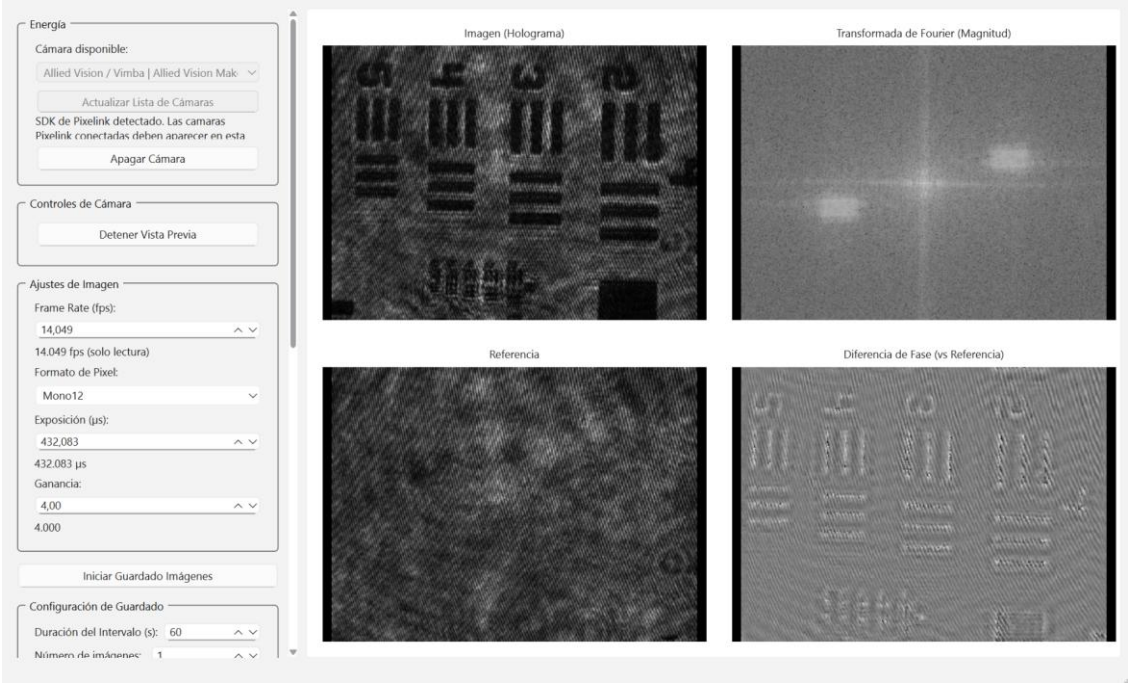


Figura 16 Captura general de la interfaz desarrollada en Python.

La reconstrucción numérica implementada en la interfaz sigue una secuencia definida. Primero, el holograma se convierte a una matriz de intensidad en punto flotante. Posteriormente, se calcula la transformada de Fourier bidimensional y se identifica el orden difractado de interés. La selección puede realizarse de forma automática, buscando el máximo espectral fuera de la región de DC, o de forma manual mediante la selección del orden en la FFT. Después, el orden seleccionado se desplaza al centro del espectro y se filtra mediante una máscara circular de radio ajustable. El campo complejo inicial se obtiene mediante transformada inversa de Fourier y posteriormente se propaga mediante el método del espectro angular.

Para el cálculo de diferencia de fase, la interfaz permite capturar una referencia experimental. La referencia se reconstruye con los mismos parámetros utilizados para los hologramas de la muestra

y se almacena su fase. En cada reconstrucción posterior, la fase del holograma se resta de la fase de referencia. La salida final se escala para visualización, permitiendo observar directamente el mapa de diferencia de fase dentro de la interfaz.

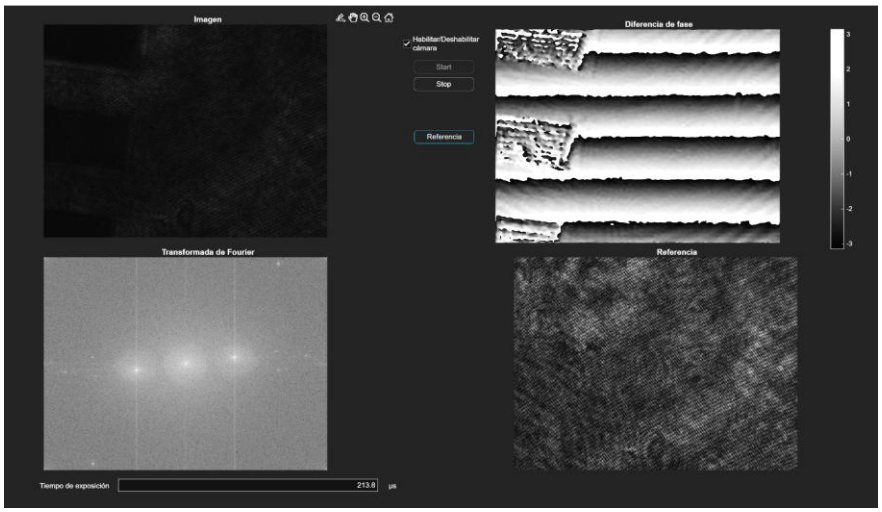


Figura 17 Captura general de la interfaz desarrollada en MATLAB.

La implementación incorpora además una caché para el término de propagación asociado al espectro angular. Esta caché se indexa a partir de las dimensiones del arreglo, la longitud de onda y el tamaño de píxel efectivo, lo que evita recalcular el mismo término cuando los parámetros de reconstrucción permanecen constantes.

La etapa inicial desarrollada en MATLAB se utilizó como prototipo de validación del flujo numérico, mientras que la versión en Python corresponde a la interfaz final de adquisición y reconstrucción. Para atender el alcance de esta comparación sin atribuir diferencias no cuantificadas entre plataformas, se mantuvieron los mismos parámetros ópticos y de reconstrucción en ambas implementaciones. La comparación se interpretó como una verificación funcional de la migración del algoritmo, y no como una prueba metrológica de precisión entre lenguajes. La **Tabla 3** Tabla 3 Comparación funcional entre la interfaz en MATLAB y la implementación en Pythonresume los elementos comparados y las características que justifican la elección de Python para la versión final.

Tabla 3 Comparación funcional entre la interfaz en MATLAB y la implementación en Python

Elemento comparado	MATLAB	Python	Observación
Propósito dentro del proyecto	Prototipo para estructurar y validar el algoritmo de reconstrucción.	Interfaz final para adquisición, reconstrucción, visualización y guardado.	La migración se justificó por integración y reproducibilidad.
Parámetros de reconstrucción	λ = 632 nm; tamaño de píxel = 2.2 µm; z = 25.5 mm.	λ = 632 nm; tamaño de píxel = 2.2 µm; z = 25.5 mm.	Se conservaron las mismas condiciones numéricas.
Flujo de reconstrucción	FFT 2D, filtrado del orden difractado, recentrado, transformada inversa y espectro angular.	FFT 2D, filtrado del orden difractado, recentrado, transformada inversa y espectro angular.	La cadena algorítmica se mantuvo.
Datos experimentales	Adquisición directa con cámara Mako U-503B, 2592 × 1944 px, Mono12, 14 fps. Solo controlando el tiempo de exposición de la cámara.	Adquisición directa con cámara Mako U-503B, 2592 × 1944 px, Mono12, 14 fps. Cambiando parámetros de captura como tiempo de exposición, ganancia, tamaño de la máscara, distancia de reconstrucción, entre otros.	En ambos se integra adquisición y reconstrucción en una sola plataforma. Pero en el caso de MATLAB la interfaz solo permite modificar parámetros básicos directamente en la interfaz.
Gestión computacional	Procesamiento de validación fuera del flujo final de adquisición.	Procesamiento asíncrono, cola de reconstrucción limitada, cola de guardado y caché de propagación.	La versión final prioriza baja latencia y estabilidad operativa.

Distribución del software	Entorno propietario sujeto a licencia.	Entorno de software libre basado en PyQt6, NumPy y SciPy.	Python facilita acceso, réplica y adaptación en otros laboratorios.

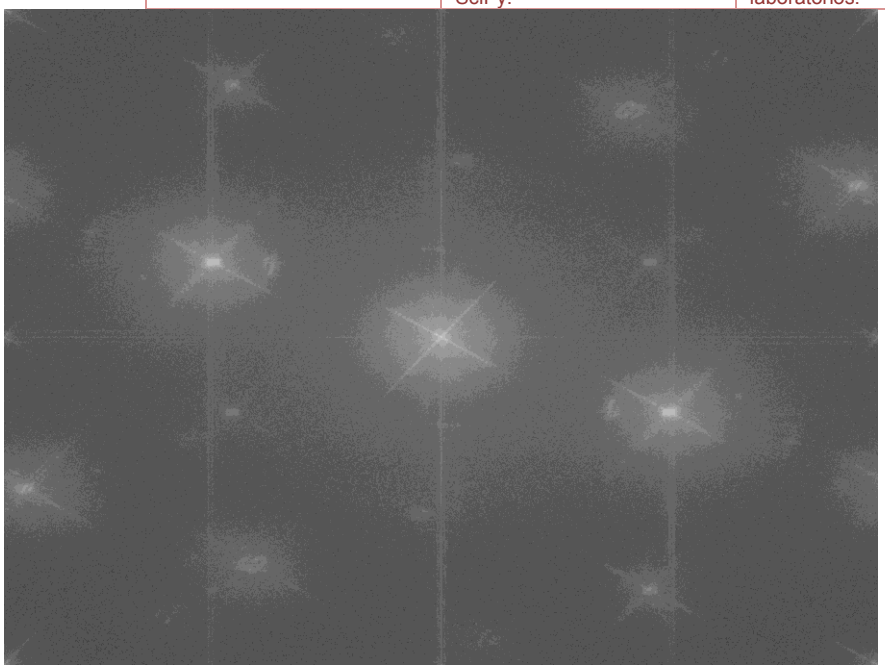


Figura 18 Transformada de Fourier del holograma registrado (La presencia de componentes repetidas en el espectro de Fourier indica que el registro del holograma se encuentra influenciado por aliasing y posibles interferencias espurias).

Durante las pruebas realizadas con la tarjeta USAF, el sistema permitió reconstruir el campo complejo y obtener mapas de fase de forma consistente como se observa en la **Figura 19** y **Figura 20**. La fase reconstruida del holograma contiene tanto la contribución introducida por el objeto como contribuciones estáticas del arreglo óptico. Por esta razón, la comparación con una referencia experimental permite obtener un mapa de diferencia de fase más adecuado para el análisis del objeto **[8]**.

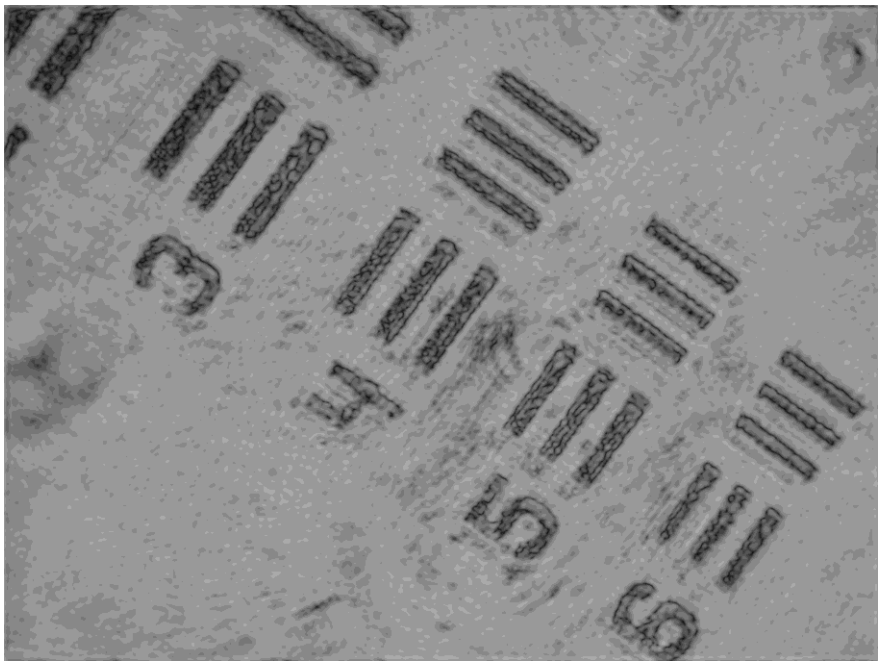


Figura 19 Holograma reconstruido.

El cálculo de diferencia de fase permitió observar variaciones asociadas a la presencia de la tarjeta USAF dentro del haz objeto. En esta etapa del trabajo no se realizó una medición cuantitativa de microdesplazamientos; por lo tanto, los resultados se interpretan como una validación de adquisición, reconstrucción y corrección de fase con referencia experimental.

Además de la reconstrucción holográfica, se evaluó la operación funcional de la interfaz como plataforma integrada. La interfaz permitió controlar la adquisición, visualizar el holograma, calcular la FFT, seleccionar el orden difractado, reconstruir el campo complejo, capturar una referencia, calcular la diferencia de fase y guardar resultados dentro de un mismo entorno.

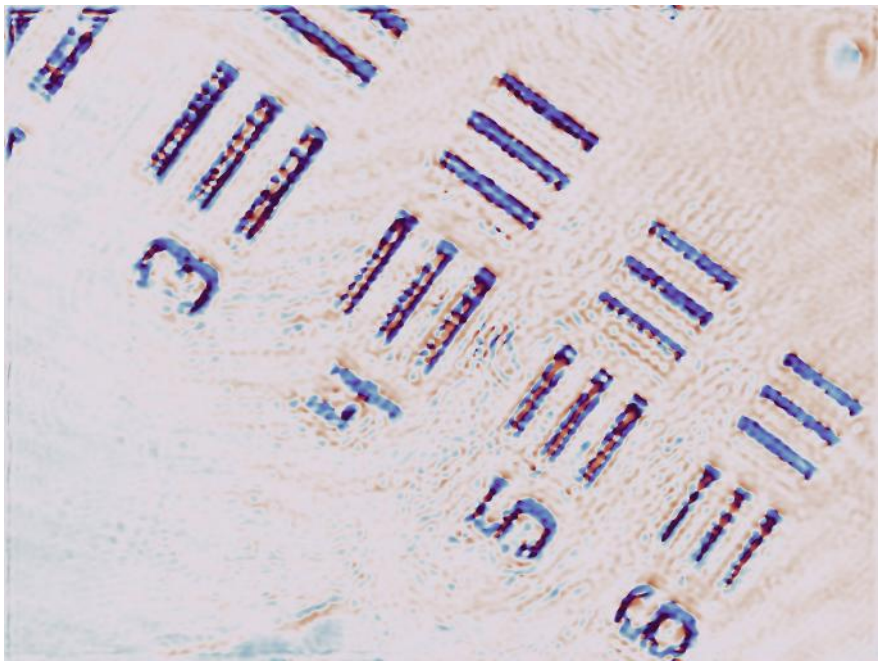


Figura 20 Mapa diferencia de fase.

La principal ventaja del sistema desarrollado es la reducción de la fragmentación del flujo experimental. En un procedimiento convencional, el usuario adquiere el holograma en un programa, exporta la imagen, ejecuta la reconstrucción en otro entorno y posteriormente realiza el análisis de fase. En la interfaz desarrollada, estas etapas se realizan dentro de una sola plataforma, conservando los parámetros de adquisición y reconstrucción durante toda la sesión experimental.
La integración de la referencia experimental también mejora la reproducibilidad, ya que la fase de referencia se obtiene bajo el mismo flujo de procesamiento. Además, la visualización casi inmediata del holograma, su FFT y la diferencia de fase permite realizar ajustes experimentales con retroalimentación directa. Esto es relevante para la alineación del sistema, la selección del orden difractado y la evaluación de la calidad de la reconstrucción.

Desde el punto de vista computacional, el uso de procesamiento asíncrono, colas de tareas y caché de propagación permite que la interfaz opere como una herramienta de monitoreo holográfico de baja latencia. La reconstrucción no requiere procesar necesariamente cada cuadro adquirido; en cambio, prioriza cuadros recientes para mantener actualizada la visualización del estado experimental. Por esta razón, el sistema puede describirse como una plataforma de reconstrucción y visualización en tiempo real o cuasi en tiempo real, dependiendo de la carga computacional y de los parámetros de reconstrucción seleccionados.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la interfaz desarrollada es una herramienta funcional para la adquisición y reconstrucción de hologramas digitales, permitiendo realizar de manera continua las etapas necesarias para el análisis holográfico dentro de un entorno de trabajo estable. La etapa en MATLAB permitió validar el flujo básico de adquisición, reconstrucción y diferencia de fase; sin embargo, se mantuvo como un prototipo limitado, con parámetros definidos en el código y sin control completo de la configuración de la cámara. Esta observación justificó la migración hacia una plataforma en Python, orientada a una arquitectura más modular, reproducible y de código abierto. Las pruebas realizadas con la tarjeta USAF 1951 permitieron verificar la correcta reconstrucción del campo óptico y la obtención de mapas de diferencia de fase, confirmando el adecuado desempeño de los algoritmos implementados.

Asimismo, las estrategias empleadas para la gestión del procesamiento contribuyeron a mantener una respuesta fluida durante la operación del sistema, favoreciendo su uso en aplicaciones experimentales donde se requiere una retroalimentación rápida de los resultados. Si bien en esta etapa no se llevó a cabo una evaluación cuantitativa de microdesplazamientos, el desarrollo realizado proporciona una base sólida para futuras aplicaciones de holografía digital cuantitativa y metrología óptica, así como para la incorporación de nuevas herramientas de análisis y medición.

BIBLIOGRAFÍA

1. U. Schnars and W. Jüptner, Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques, Springer, 2005.
2. T. Kreis, Handbook of Holographic Interferometry, Wiley-VCH, 2005.
3. J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 3rd ed., Roberts & Company, 2005.
4. E. Cuche, P. Marquet, and C. Depeursinge, “Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms,” Applied Optics, vol. 38, no. 34, pp. 6994–7001, 1999.
5. P. Picart and J. Leval, “General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography,” Journal of the Optical Society of America A, vol. 25, no. 7, pp. 1744–1761, 2008.
6. Allied Vision Technologies, Mako U-503B Data Sheet, Allied Vision, 2016.
7. M. K. Kim, Digital Holographic Microscopy: Principles, Techniques, and Applications, Springer, 2011.

8. T. Colomb, J. Kühn, F. Charrière, C. Depeursinge, P. Marquet, and N. Aspert, “Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram,” Optics Express, vol. 14, no. 10, pp. 4300–4306, 2006.

SÍNTESIS SOSTENIBLE DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CARBONO FLUORESCENTES PARA BIOIMAGEN

Oxana Vasilievna Kharissova[1], Daniela Sarahí Zúñiga Bueno[1], José Apolinar Loyola Rodríguez[1], Idalia Gómez De La Fuente[2]

[1]Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UANL, [2]Facultad de Ciencias Químicas, UANL.
oxana.kharissova@uanl.edu.mx

RESUMEN

Para aplicaciones biológicas y médicas, como la bioimagen y el marcaje celular, es fundamental disponer de nanopartículas de tamaño nanométrico en el rango de 2–5 nm, ya que estas dimensiones favorecen su internalización celular y reducen posibles efectos adversos. Los puntos cuánticos presentan propiedades luminiscentes muy atractivas; sin embargo, algunos de ellos pueden mostrar toxicidad en sistemas biológicos, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevos métodos de síntesis más ecológicos, sostenibles y económicamente viables, que además contribuyan a disminuir los costos de producción. El objetivo de este trabajo fue la síntesis de nanoestructuras tipo puntos cuánticos de carbono (CQDs) con propiedades fluorescentes, obtenidas a partir de precursores tales como ácido ascórbico, sal sódica de cobalto 4,5-octacarboxiftalocianina (Teraphtal) y cafeína, bajo condiciones suaves y sin la presencia de ácidos fuertes. Para la síntesis de los CQDs se emplearon técnicas de irradiación por microondas y ultrasonido, con el fin de promover procesos de carbonización y formación de dominios conjugados de manera eficiente y controlada. De manera individual, los precursores no presentan luminiscencia significativa; no obstante, la combinación de Teraphtal y ácido ascórbico genera una fluorescencia débil. La aplicación de energía mediante microondas o ultrasonido produce un efecto positivo en la luminiscencia de las nanopartículas obtenidas, incrementando la intensidad de emisión. Asimismo, la incorporación de cafeína favorece un aumento adicional en la respuesta fotoluminiscente. La espectroscopia FT-IR se utilizó para identificar los grupos funcionales presentes y analizar posibles interacciones intermoleculares, mientras que la espectroscopia UV-Vis permitió evaluar las transiciones electrónicas y la posible formación de dominios π-conjugados. Las mediciones de fotoluminiscencia confirmaron la mejora en la emisión tras la incorporación de cafeína, lo que sugiere que esta molécula favorece interacciones moleculares y procesos electrónicos que promueven la formación de nanoestructuras emisivas. En conjunto, los resultados obtenidos contribuyen al desarrollo de rutas alternativas y más sostenibles para la síntesis de CQDs fluorescentes, con potencial aplicación en el campo de la bioimagen y otras aplicaciones biomédicas.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, se ha sintetizado nanomateriales y nanoestructuras importantes para el desarrollo de las nanotecnologías. Entre esos nanomateriales se encuentran los puntos cuánticos (QDs), partículas a nanoescala (diámetros promedio de 1-10 nm) y presentan propiedades ópticas muy relevantes para su implementación en bioimagen y aplicaciones biomédicas [1]. A pesar de que estos QDs se han utilizado en la biomedicina, hay ciertos factores de riesgo que conllevan la implementación de los QDs, como su síntesis, los residuos generados por la síntesis y el daño negable que podría afectar a la salud tanto para animales como para humanos [2–5].

Existen diferentes tipos de QDs, entre ellos se destacan los puntos cuánticos de carbono (CQDs), que son nanoestructuras de igual manera, de 1 a 10 nm de diámetro, su estructura consiste en grupos sp^2/sp^3 basados en carbono y oxígeno/nitrógeno o agregaciones poliméricas [6]. Estas nanoestructuras se destacan ya que, además de tener propiedades excelentes en fotoluminiscencia, son biocompatibles y amigables con el ecosistema [7], facilitando su uso en biomedicina sin necesidades de recubrimientos especiales en los QDs convencionales.

Las propiedades ópticas de los QDs están relacionadas directamente con el confinamiento cuántico, el tamaño de su partícula y composición superficial [8]. En los CQDs, sus propiedades ópticas se les atribuye principalmente a sus estados superficiales, defectos estructurales y grupos funcionales [9–11]. Actualmente las síntesis de nanomateriales se dividen en dos rutas: top-down y bottom-up. Los métodos de síntesis con enfoque top-down consisten en la obtención del nanomaterial a partir de la destrucción o deterioro de un material a granel o macroescala, mediante procesos físicos. Por otro lado, los métodos de síntesis con enfoque bottom-up utilizan procesos químicos, generando una acumulación de átomos con átomos, moléculas con moléculas o grupos con grupos [12].

El enfoque bottom-up es el más implementado actualmente debido a que se tienen un mejor control de tamaño y desarrollo de las nanoestructuras. El uso de irradiación de microondas y ultrasonido como métodos de síntesis de CQDs es una buena alternativa debido a su fácil uso, son métodos rápidos y con buenos resultados, además de ser económicos. En este sentido, ante la necesidad de buscar alternativas con el mínimo impacto ambiental y reducir la producción de residuos, se necesita de la constante búsqueda de desarrollar CQDs mediante métodos verdes, es por eso por lo que utilizar precursores a base de carbono para sintetizar CQDs mediante estas metodologías es conveniente.

TEORÍA

Las propiedades más relevantes de los CQDs son: la absorción, razón logarítmica entre la intensidad de luz incidente y la trasmitida a través de una muestra, este fenómeno se relaciona con las transiciones electrónicas generadas por el confinamiento cuántico, donde los espectros de absorción dependen directamente del tamaño, composición y superficie de las nanopartículas [13- 14].

En los CQDs, la absorción óptica suele localizarse principalmente en la región ultravioleta, presentando bandas asociadas a transiciones $\boldsymbol{\pi \rightarrow \pi^*}$ de enlaces aromáticos y $\boldsymbol{C = C}$ y transiciones $\boldsymbol{n \rightarrow \pi^*}$ relacionadas con grupos funcionales oxigenados como $\boldsymbol{C = O}$. Asimismo, pueden observarse atribuciones provenientes de defectos superficiales y estados asociados a grupos funcionales presentes en la superficie del material [15].

La fotoluminiscencia (PL) constituye una de las propiedades más importantes de los CQDs debido a sus aplicaciones potenciales en bioimagen, sensores y dispositivos optoelectrónicos. Sintesis estudios han demostrado que procesos de funcionalización superficial y dopaje con heteroátomos pueden mejorar considerablemente la intensidad de emisión y estabilidad del material [6].

La emisión fotoluminiscente se atribuye principalmente a estados superficiales, defectos estructurales y grupos funcionales, por lo que el rendimiento cuántico (QY, definido como la relación entre el número de fotones emitidos y el número total de fotones absorbidos, parámetro que permite evaluar la eficiencia luminiscente de los CQDs) depende fuertemente de la química superficial y del método de síntesis empleado [16-17].

La irradiación de microondas (MW) hacia medios acuosos genera un calentamiento uniforme que es producto de la rotación constante de las moléculas de agua que buscan alinearse con las ondas generadas por el campo eléctrico del microondas (**Figura 1**). Esta rotación genera una fricción molecular, la cual se convierte en energía o calor, lo cual es beneficioso para la síntesis ya que nos ayuda a que se descompongan y reorganicen para formar estructuras carbonosas nanométricas [18–20].

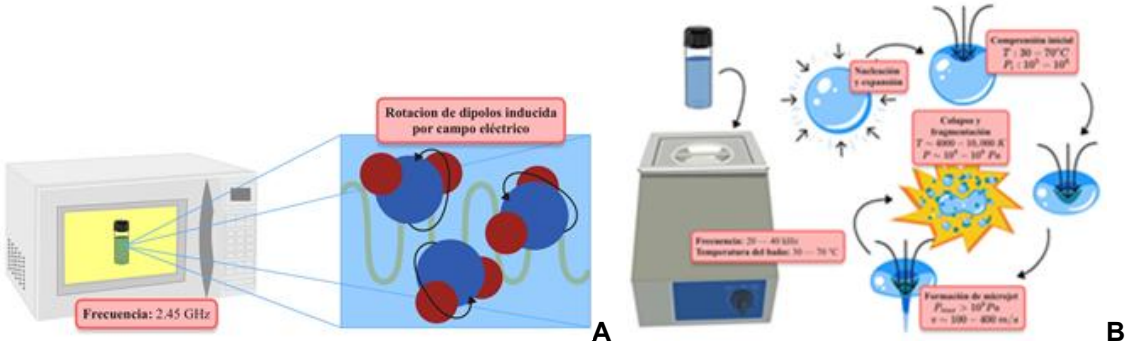


Figura 1. Esquema de moléculas de agua con el campo generado por: A) de la irradiación de microondas; B) Efecto de cavitación del ultrasonido en soluciones acuosas.

El método de síntesis por ultrasonido (US) se destaca por su efecto de cavitación, el cual implica en la formación de microburbujas que comenzarán a expandirse hasta colapsar por la influencia del campo acústico (**Figura 1B**). El colapso de estas microburbujas desencadena altas temperaturas y presiones, donde en condiciones extremas, se puede dar lugar a muchas reacciones químicas [21].

La implementación de estos métodos que se llevan a cabo en condiciones suaves (temperatura ambiente y presión normal) donde en la mayoría de los casos se utiliza agua como disolvente, para evitar el uso de disolventes tóxicos y peligrosos donde regularmente son utilizados en otros métodos. Así conseguimos una metodología que cumple con los criterios de la química verde [22].

Se observan varios procesos fisicoquímicos durante la síntesis de los CQDs. Una de las reacciones más importantes son las reacciones REDOX (oxidación-reducción), son definidas como aquellas donde se da lugar a la transferencia de electrones entre los reactivos involucrados. Donde la perdida de electrones en una sustancia es denominada como oxidación (agentes oxidantes), mientras que la ganancia de electrones es reducción (agentes reductores) [23]. Estos procesos REDOX promueven la formación de núcleos carbonosos mediante transformación química de los precursores. Sin embargo, se ha demostrado que, bajo condiciones suaves, ocurren fenómenos de ensamblaje molecular que contribuye a la formación de CQDs. Las moléculas implementadas durante la síntesis pueden interactuar mediante fuerzas intermoleculares, así favoreciendo su organización y proximidad espacial. Con esta reorganización se facilitan las reacciones de condensación química entre los precursores, promoviendo la formación de estructuras. Dependiendo del material utilizado, se pueden generar dominios aromáticos parcialmente conjugados, asociados con la aparición de regiones ricas en carbono sp^2. Estas mismas regiones se han relacionado con la generación de estados electrónicos confinados responsables de la emisión fotoluminiscente característica de los CQDs [24–26].

Las ftalocianinas son compuestos macrocíclicos aromáticos altamente conjugados, formados por unidades isoindólicas unidas mediante átomos de nitrógeno, que dan lugar a un sistema $\boldsymbol{\pi}$ extendido con alta estabilidad química y térmica [27]. Además, las ftalocianinas poseen la capacidad de coordinar iones metálicos en su centro, formando complejos metal-ftalocianina que actúan como sistemas electrónicamente activos. Estos complejos presentan propiedades REDOX y catalíticas [28]. Como consecuencia de su sistema $\boldsymbol{\pi}$ conjugado, las ftalocianinas presentan absorción intensa en la región visible del espectro, asociadas a transiciones electrónicas del tipo $\boldsymbol{\pi} \rightarrow \boldsymbol{\pi}^*$, lo que las hace de interés en aplicaciones optoelectrónicas y fotodinámicas.

En el contexto de materiales basados en carbono, se ha reportado que las ftalocianinas pueden interactuar con estructuras carbonosas, que ayuda a la deslocalización electrónica y modificación de sus propiedades fisicoquímicas [29]. Adicionalmente, en complejos de ftalocianinas metálicas, como

las de cobalto, el centro metálico puede participar en procesos REDOX reversibles, facilitando la transferencia de electrones y actuando como sistema catalítico activo [28, 30].

Por otro lado, se ha demostrado que los CQDs dopados con nitrógeno pueden presentar una mayor estabilidad, mejor intensidad de emisión y propiedades ajustables. Asimismo, el control de la cantidad de nitrógeno permite modular la longitud de emisión, evidenciando la relación directa entre el dopaje y las propiedades de fotoluminiscencia [31].

El uso de la cafeína como precursor dopante en la síntesis de CQDs, debido a su estructura aromática favorece la formación del núcleo de carbono y con su estructura heterocíclica rica en nitrógeno, contribuye al dopaje durante el proceso de carbonización [32].

PARTE EXPERIMENTAL

Se realiza la síntesis de CQDs mediante los métodos verdes: irradiación de microondas y ultrasonido, utilizando los siguientes precursores: Ácido ascórbico (AA), ácido L-ascórbico, grado reactivo, Sigma-Aldrich, Cat. No. A0278, Lot No. SLCC2424, 100 g; Teraphtal (TP), sal sódica de cobalto 4,5-octacarboxiftalocianina, liofilizado para preparación de solución inyectable, 0.05 g, FGUP GNTs NIOPIK, Rusia, Lot No. 021010; Cafeína (CAF), cafeína anhidra, CAS: 58-08-2, grado alimenticio, Forza Tech, México. Disolvente: Agua destilada (AD), CTR Scientific, Lot No. 240659, CAS: 7732-18-5, 20 L.

Se empleó un limpiador ultrasónico Fisher ScientificTM, modelo FS140, con una frecuencia de operación de 42 kHz y una potencia de 135 W. Este equipo es el responsable de proporcionar el efecto de cavitación acústica para la síntesis de los CQDs.Se utilizó un horno de microondas de uso doméstico, Daewoo Electronics, modelo KOR-630A, con una frecuencia de operación de 2,450 MHz y con una potencia de 700 W. Este equipo es el responsable de la irradiación de microondas hacia las muestras para la síntesis de CQDs.

Para la preparación de las muestras, se realizó dos “soluciones madre”, de dos diferentes sistemas. El primer sistema o “sistema TP+AA” comprende de los precursores TP y AA a una proporción molar aproximada de 1:1 (0. 5 mg de cada compuesto). Estos compuestos fueron disueltos con 50 ml de AD, posteriormente esta solución fue fraccionada en 5 alícuotas iguales para la obtención de las diferentes muestras, garantizando condiciones iniciales idénticas en todos los ensayos.

En el segundo sistema o “sistema TP+AA+CAF”, se realizó prácticamente lo mismo, con el ligero cambio de añadir CAF como tercer precursor, en proporción 1:1:1 (0.005 g de cada precursor), igualmente disueltos en 50 ml de AD y fraccionada la solución madre en 5 alícuotas iguales
Cada sistema fue sometido a los mismos tiempos de síntesis para comparar los efectos de las microondas y ultrasonido. Los tiempos aplicados por cada tratamiento se observan detalladamente en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Datos de muestras utilizados en el experimento con tratamientos aplicados y tiempos.

Sistema	Nombre de la muestra	Método aplicado	Tiempo en MW (s)	Tiempo en US (min)
TP + AA	C-A	Ninguno (control)	0	0
	U10-A	US	0	10
	U20-A	US	0	20
	M10-A	MW	10	0
	M20-A	MW	20	0
TP + AA +	C-B	Ninguno (control)	0	0
	U10-B	US	0	10
	U20-B	US	0	20
	M10-B	MW	10	0

CAF	M20-B	MW	20	0

Se realizó diversas técnicas de caracterización para recolectar datos de los CQDs que nos permiten analizar las propiedades tanto físicas como químicas:
Espectroscopia Ultravioleta-Visible: Los CQDs muestran fuertes picos de absorción en la región ultravioleta (230-320 nm), pero pueden variar dependiendo del método de síntesis, tamaño de partícula y características estructurales de los CQDs [33].

Espectroscopia de Fotoluminiscencia: La fotoluminiscencia (PL) está relacionada con efectos de confinamiento cuántico, estados superficiales y defectos estructurales presentes en las nanopartículas. La espectroscopia de PL permite analizar los procesos de absorción y emisión electrónica, proporcionando información sobre las propiedades ópticas y electrónicas de los CQDs [34].

Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier: La espectroscopia FTIR permite identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de los CQDs, tales como grupos hidroxilo, carbonilo y carboxilo [35].

RESULTADOS

Primeramente, se sometió a MW (20 s) y US (20 min) por separado cada precursor utilizado en la síntesis. Se preparó en tres viales 0.001 g de cada precursor disueltos en 10 ml de AD. Como resultado, ningún precursor presentó algún tipo de fluorescencia bajo luz UV (365 nm), ni antes y ni después. Esto es de suma importancia ya que nos demuestra (visualmente) que la fluorescencia no provendrá únicamente de un solo precursor, sino de la combinación y tratamiento de los precursores. Después de la síntesis de los sistemas, se evaluó los cambios visuales presentes en cada uno En la **Figura 3**, se observan los cambios visuales de los sistemas, donde se puede visualizar las diferencias (tanto en luz visible como bajo luz UV de 365 nm) de las muestras con los diferentes tratamientos. En el primer sistema, la muestra control presenta una emisión muy débil, casi nula, muestras que las muestras que exhiben una mayor fluorescencia son las que sí tienen tratamiento. Se aprecia que existen variación de tonalidades entre verdosas y azules, que nos sugiere la generación de la emisión podría deberse a la aplicación de los tratamientos, que favorecen la transformación química o la transformación estructuras necesarias para la aparición de una mayor fluorescencia entre las muestras. Analizando cualitativamente, las muestras que aparentemente presentan una mayor fluorescencia en el sistema TP+AA son las muestras U20 y M20, de las cuales podríamos asumir que tienen una mayor eficiencia de emisión. Por otro lado, en el segundo sistema, muestra algo interesante se discutir. Todas las muestras, incluyendo la muestra control, presenta una única tonalidad verde, con ligeras variaciones en la intensidad del color. Este cambio es relevante ya que nos indica que cafeína favorece a la generación de estados electrónicos emisores posiblemente a través de interacciones supramoleculares o aún mejor, la modificación en el entorno electrónico del sistema. Con esto presente, podríamos deducir que hay una generación de nuevas especies emisoras en los sistemas, que podrían ser producto de una alteración en la estructura electrónica o la formación de defectos en la muestra producidas por el tratamiento.

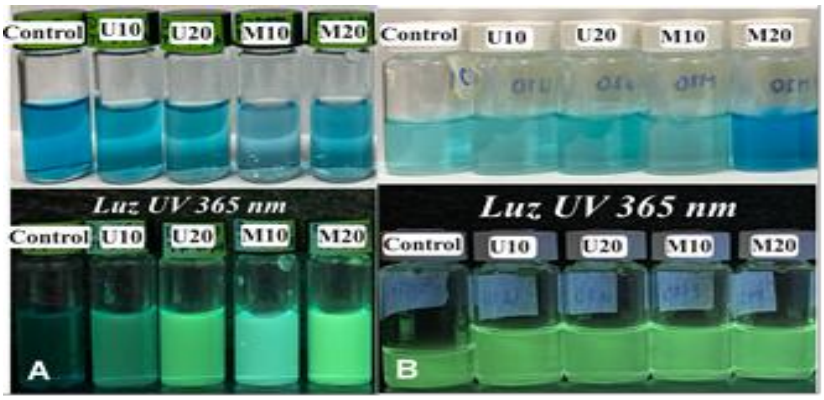


Figura 3. Cambio visual de las muestras. A) Sistema TP+AA y B) Sistema TP+AA+CAF.

Debido a las tonalidades verdes de las muestras, podríamos deducir que la incorporación de nitrógeno (tanto del TP como de la CAF) y la posible generación de vacancias estructurales (tipo N-V), podrían favorecer la formación de configuraciones defectivas asociadas al nitrógeno, que son capaces de actuar como centros emisivos ya que modifican los estados electrónicos de la nanoestructura, así favoreciendo la emisión de luz en la región verde.

La **Figura 4** representa los espectros de absorción UV-Vis del sistema TP+AA, junto con el espectro de la muestra control para comparar. Todas las muestras presentan bandas intensas en la región UV, con máximos alrededor de 225–226 nm y una segunda contribución cercana a 300 nm. La banda en 225 nm se asocia principalmente a transiciones electrónicas $\boldsymbol{\pi \rightarrow \pi^*}$ de sistemas aromáticos locales, mientras que la señal alrededor de 300 nm puede atribuirse a sistemas $\boldsymbol{\pi}$ conjugados más extendidos como a transiciones relacionadas con grupos funcionales oxigenados (como $\boldsymbol{C = O}$) formados durante los procesos de carbonización y oxidación del ácido ascórbico. Adicionalmente se observa una ligera absorción en la región visible, alrededor de 640 nm, esta banda se encuentra dentro de la región característica de las bandas Q de las ftalocianinas metálicas, sugiriendo que la estructura macrocíclica original persiste aún después de los tratamientos y el tiempo.

La **Figura 5** representa los espectros de absorción UV-Vis del sistema TP+AA+CAF. Todos los espectros presentan una banda alrededor de 268–270 nm, atribuida a transiciones $\boldsymbol{\pi \rightarrow \pi^*}$ de dominios aromáticos sp^2 más extendidos. Esta banda es ampliamente reportada como una firma espectroscópica del núcleo carbonoso de los CQDs y está asociada a la reorganización aromática del ácido ascórbico durante su oxidación. También se aprecia una banda alrededor de 313–316 nm, la cual se atribuye a transiciones $\boldsymbol{n \rightarrow \pi^*}$ asociadas a grupos $\boldsymbol{C = O}$ y $\boldsymbol{C - N}$. En la región visible, los espectros muestran una absorción débil, pero reproducible entre 671–678 nm que coinciden con la región de las bandas Q de las ftalocianinas metálicas del TP.

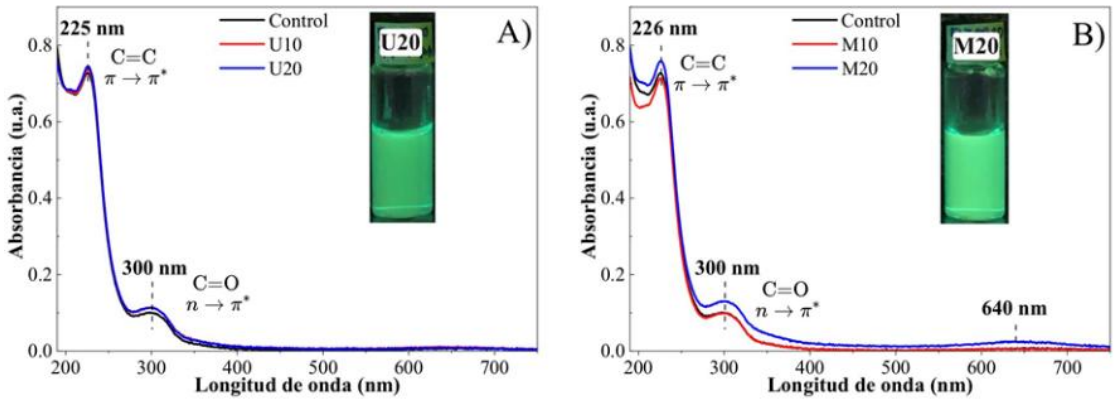


Figura 4. Espectros de absorción UV-Vis de las muestras del sistema TP+AA. A) Muestra control (C-A) y muestras sometidas a ultrasonido durante 10 min (U10-A) y 20 min (U20-A). B) Muestra control (C-A) y muestras obtenidas mediante microondas durante 10 min (M10-A) y 20 min (M20-A).

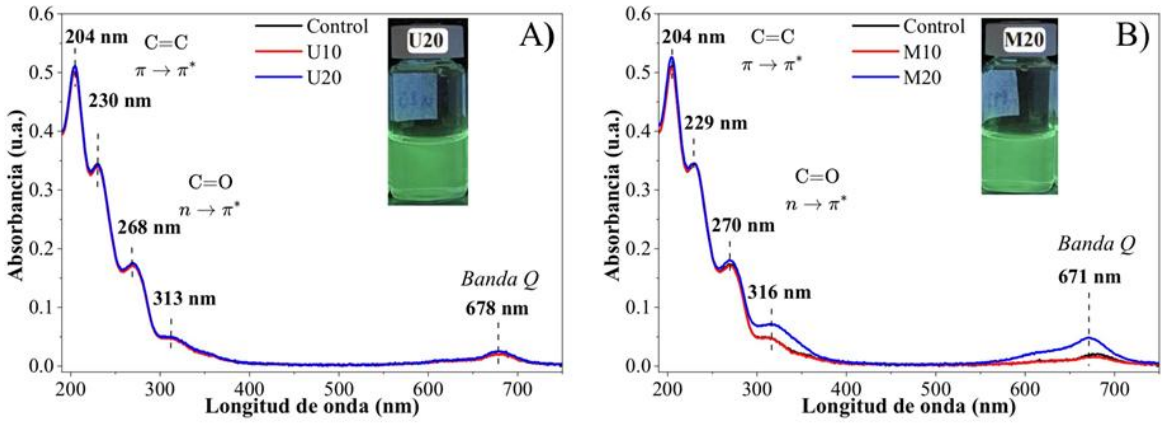


Figura 5. Espectros de absorción UV-Vis de las muestras del sistema TP+AA+CAF. A) Muestra control (C-B) y muestras sometidas a ultrasonido durante 10 min (U10-B) y 20 min (U20-B). B) Muestra control (C-B) y muestras obtenidas mediante microondas durante 10 min (M10-B) y 20 min (M20-B).

Los espectros de fotoluminiscencia de las muestras del sistema TP+AA se observan en la **Figura 6**. Donde tienen una emisión centrada en la región 510–520 nm al ser excitadas entre 350 y 380 nm.

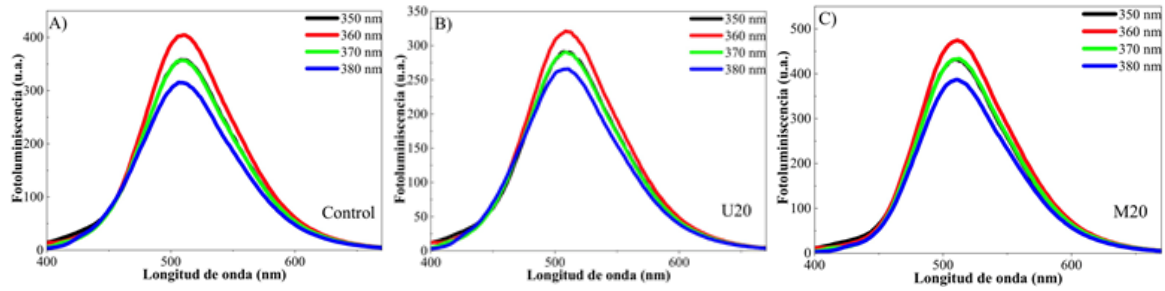


Figura 6. Espectros de fotoluminiscencia del sistema TP+AA obtenidos a diferentes longitudes de onda de excitación. A) Muestra control (C-A). B) Muestra sometida a ultrasonido durante 20 min (U20-A). C) Muestra sintetizada mediante microondas durante 20 min (M20-A).

Entre las muestras analizadas, M20 presenta la mayor intensidad de emisión, lo que podría indicar una mayor densidad de centros emisores activos generados bajo las condiciones de síntesis por microondas a 20 s.

En todos los casos se observa una banda de emisión ancha y asimétrica, lo cual es consistente con la presencia de múltiples centros emisores y una distribución heterogénea de estados electrónicos superficiales. Este comportamiento se asocia a defectos superficiales generados por funcionalidades oxigenadas o nitrogenadas, los cuales crean un entorno electrónico heterogéneo que resulta en una emisión dependiente de la longitud de onda excitada [36]. Entre las muestras analizadas, M20 presenta la mayor intensidad de emisión, lo que podría indicar una mayor densidad de centros emisores activos generados bajo las condiciones de síntesis por microondas a 20 s.

En la **Figura 7** se muestran los espectros de fotoluminiscencia del sistema TP+AA+CAF. Donde se ve un claro incremento en la fotoluminiscencia, atribuyéndose a la cafeína. Este comportamiento sugiere que la incorporación de cafeína como fuente de nitrógeno modifica el entorno electrónico y

superficial del CQD, favoreciendo a la generación de nuevos estados emisivos o defectos superficiales asociados al dopaje de nitrógeno.

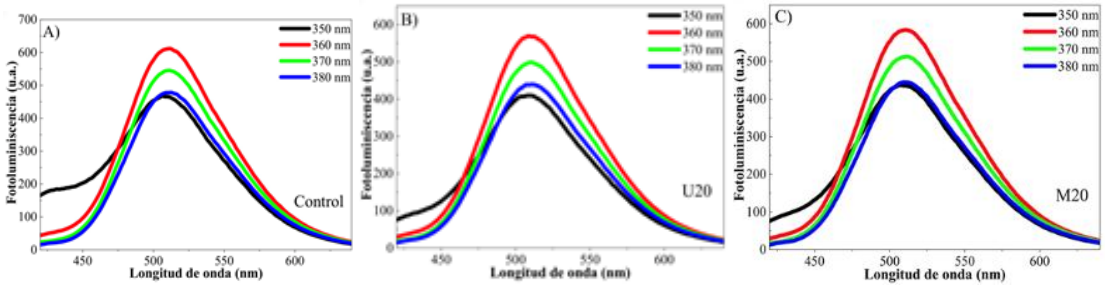


Figura 7. Espectros de fotoluminiscencia del sistema TP+AA+CAF obtenidos a diferentes longitudes de onda de excitación. A) Muestra control (C-B). B) Muestra sometida a ultrasonido durante 20 min (U20-B). C) Muestra sintetizada mediante microondas durante 20 min (M20-B).

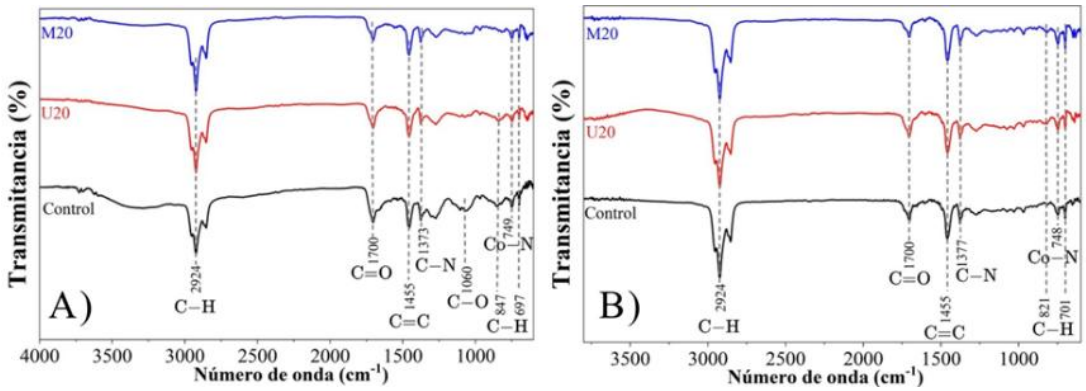


Figura 8. Espectros de transmitancia FTIR de los dos sistemas. A) Sistema TP+AA (C-A, U20-A y M20-A) y B) Sistema TP+AA+CAF (C-B, U20-B y M20-B).

En los espectros FTIR del sistema TP+AA (**Figura 8A**) se identifican bandas bien definidas correspondientes a los precursores. Se observan señales en 2924 cm^{-1} atribuida a vibraciones de estiramiento $\boldsymbol{C-H}$, banda en 1700 cm^{-1} asociada a grupos carbonilo ($\boldsymbol{C=O}$) del ácido ascórbico, las bandas en 1455 y 1373 cm^{-1} correspondientes a vibraciones $\boldsymbol{C=C}$ y $\boldsymbol{C-N}$ del sistema macrocíclico de la ftalocianina, la señal en 1060 cm^{-1} atribuida a enlaces $\boldsymbol{C-O}$ y las bandas en 749 y 697 cm^{-1} asociadas a la vibración $\boldsymbol{Co-N}$ y deformaciones $\boldsymbol{C-H}$ fuera del plano, respectivamente.Se observa que las muestras U20 y M20 de este sistema tienen modificaciones iniciales en la intensidad y forma de las bandas asociadas a los grupos $\boldsymbol{C=O}$ y $\boldsymbol{C-O}$ lo que aporte el inicio de transformación química del ácido ascórbico.

En los espectros FTIR del sistema TP+AA+CAF (**Figura B**) se muestran muy similar con el primer sistema, particularmente en la región de 1700 a 1200 cm^{-1}. En la muestra control se identifican las bandas características de los tres precursores: 2924 cm^{-1} atribuida a vibraciones de estiramiento $\boldsymbol{C-H}$, la banda en 1700 cm^{-1} de grupos carbonilo ($\boldsymbol{C=O}$), señales en 1455 y 1377 cm^{-1} a vibraciones $\boldsymbol{C=C}$ y $\boldsymbol{C-N}$ y bandas 748 y 701 cm-1 atribuidas a la vibración $\boldsymbol{Co-N}$ y deformaciones $\boldsymbol{C-H}$ fuera del plano.

CONCLUSIONES

Los resultados demuestran que los tratamientos de ultrasonido y microondas son capaces inducir transformaciones químicas y estructurales en los precursores, especialmente en el primer sistema, favoreciendo la formación de nanoestructuras carbonosas con propiedades luminiscentes

destacables. Las diferencias observadas en el comportamiento visual de las muestras antes y después del tratamiento, bajo la irradiación UV de 365 nm indican que la generación de especies emisoras es consecuencia directa de los tratamientos aplicados y no únicamente de los precursores individuales. Por otro lado, en el segundo sistema se observó fluorescencia verde intensa en todas las muestras, incluyendo la muestra control, sugiriendo que la cafeína modifica directamente las propiedades ópticas y electrónicas del sistema, independientemente de la aplicación de los métodos de activación energética. Debido a que la cafeína actúa como fuente de nitrógeno, su incorporación podría favorecer la generación de defectos estructurales y estados electrónicos superficiales asociados al nitrógeno, contribuyendo así a los procesos de luminiscencia observados.

Respecto a las espectroscopias, todos los espectros presentan bandas de absorción coincidentes con transiciones electrónicas típicas de los CQDs, presentando grupos funcionales presentes en los típicos CQDs y mostrando una fotoluminiscencia principal en la región verde del espectro (500 nm) bajo excitación UV de 360 nm. Estos hallazgos constituyen una contribución al entendimiento de los mecanismos de formación y emisión de CQDs sintetizados por rutas verdes y abren perspectivas para el desarrollo de nanomateriales luminiscentes de bajo costo, con potencial para aplicaciones en bioimagen y biomedicina.

AGRADECIMI ENTOS

Los autores se agradecen a UANL por el soporte financiera del programa de apoyo de investigación PROACTI.

BIBLIOGRAFÍA

1. B.Gidwani *et al.*, “Quantum dots: Prospectives, toxicity, advances and applications,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, Vol. 61, 2021, Article 102308.
2. M.Gallagher, D. M. Mitrano, W. Wohlleben, and B. Nowack, “Release, detection and toxicity of fragments generated during artificial accelerated weathering of CdSe/ZnS quantum dot polymer composites,” *Environ. Sci.: Nano*, Vol. 5, No. 7, 2018, pp. 1694–1710.
3. Y.Wang and B. Nowack, “Dynamic probabilistic material flow analysis of nano-SiO2, nano iron oxides, nano-CeO2, nano-Al2O3, and quantum dots in seven European regions,” *Environ. Pollut.*, Vol. 235, 2018, pp. 589–601.
4. X. Xiang *et al.*, “The relationship between the length of surface ligand and effects of CdTe quantum dots on the physiological functions of isolated mitochondria,” *Chemosphere*, Vol. 184, 2017, pp. 1108–1116.
5. G.Lin *et al.*, “In vivo toxicity assessment of non-cadmium quantum dots in BALB/c mice,” *Nanomedicine*, Vol. 11, No. 2, 2015, pp. 341–350.
6. S.Zhu *et al.*, “The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective,” *Nano Res.*, Vol. 8, No. 2, 2015, pp. 355–381.
7. X.Tian *et al.*, “Carbon Quantum Dots: In vitro and in vivo Studies on Biocompatibility and Biointeractions for Optical Imaging,” *Int. J. Nanomed.*, Vol. 15, pp. 6519–6529, 2020.
8. S. Brkić, “Optical properties of quantum dots,” *Eur. Int. J. Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 4, 2016, pp. 98–107.
9. Y. Dong *et al.*, “Carbon-Based Dots Co-doped with Nitrogen and Sulfur for High Quantum Yield and Excitation-Independent Emission,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 52, No. 30, 2013, pp. 7800–7804.
10. X. Miao *et al.*, “Synthesis of Carbon Dots with Multiple Color Emission by Controlled Graphitization and Surface Functionalization,” *Adv. Mater.*, Vol. 30, No. 1, 2018, Art. 1704740.
11. Q.Xu *et al.*, “Single-Particle Spectroscopic Measurements of Fluorescent Graphene Quantum Dots,” *ACS Nano*, Vol. 7, No. 12, 2013, pp. 10654–10661.
12. N. Kumar and R. Kumar, *Nanotechnology and Nanomaterials in the Treatment of Life-Threatening Diseases*. Oxford, UK: William Andrew, 2013, pp. 1–397.
13. Z. Hens and I. Moreels, “Light absorption by colloidal semiconductor quantum dots,” *J. Mater. Chem.*, Vol. 22, No. 21, 2012, pp. 10406–10415.

14. V. I. Klimov, Ed., *Nanocrystal Quantum Dots*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
15. A.Gaigalas *et al.*, "Optical Properties of CdSe/ZnS Nanocrystals," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, Vol. 119, 2014, pp. 610–627.
16. K.Hola *et al.*, "Carbon dots—Emerging light emitters for bioimaging, cancer therapy and optoelectronics," *Nano Today*, Vol. 9, No. 5, 2014, pp. 590–603.
17. M.Nazar, M. Hasan, B. Wirjosentono, B. A. Gani, and C. Nada, "Microwave Synthesis of Carbon Quantum Dots from Arabica Coffee Ground for Fluorescence Detection of Fe3+, Pb2+, and Cr3+," *ACS Omega*, Vol. 9, No. 26, 2024, pp. 28416–28424.
18. N.Sharma, I. Sharma, and M. K. Bera, "Microwave-Assisted Green Synthesis of Carbon Quantum Dots Derived from Calotropis Gigantea as a Fluorescent Probe for Bioimaging," *J. Fluoresc.*, Vol. 32, No. 3, 2022, pp. 1039–1049.
19. B. Jusuf, N. Sambudi, Isnaeni, and S. Samsuri, "Microwave-assisted synthesis of carbon dots from eggshell membrane ashes by using sodium hydroxide and their usage for degradation of methylene blue," *J. Environ. Chem. Eng.*, Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 7234–7242.
20. S.Kentish and M. Ashokkumar, "The Physical and Chemical Effects of Ultrasound," in *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, H. Feng, G. V. Barbosa-Cánovas, and J. Weiss, Eds. New York, NY, USA: Springer, 2011, pp. 1–12.
21. G.Matyszczak *et al.*, "Sonochemical synthesis of SnS and SnS2 quantum dots from aqueous solutions, and their photo- and sonocatalytic activity," *Ultrason. Sonochem.*, Vol. 105, 2024, Article 106834.
22. L.E. Briand and V. Vetere, "Reacciones de oxidación-reducción," in *Introducción a la química: curso con estrategias alternativas para la enseñanza de la Química CEAEQ*, L. E. Briand and V. Vetere, Eds. La Plata, Argentina: EDULP, 2022, pp. 130–145.
23. D.Qu and Z. Sun, "The formation mechanism and fluorophores of carbon dots synthesized via a bottom-up route," *Mater. Chem. Front.*, Vol. 4, No. 2, 2020, pp. 400–420.
24. H. Tang, X. Zheng, Z. Lu, E. Zhou, and S. Chen, "Mechanistic Study of Carbon Dot Formation," *Chem. Mater.*, Vol. 27, No. 13, 2015, pp. 4728–4735.
25. I.J. Gómez *et al.*, "Spontaneous formation of carbon dots helps to distinguish molecular fluorophores species," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 610, 2023, Article 155536.
26. G.de la Torre, P. Vázquez, F. Agulló-López, and T. Torres, "Role of structural factors in the nonlinear optical properties of phthalocyanines and related compounds," *Chem. Rev.*, Vol. 104, No. 9, 2004, pp. 3723–3750.
27. A.B. Sorokin, "Phthalocyanine metal complexes in catalysis," *Chem. Rev.*, Vol. 113, No. 10, 2013, pp. 8152–8191.
28. N. Han *et al.*, "Supported Cobalt Polyphthalocyanine for High-Performance Electrocatalytic CO2 Reduction," *Chem*, Vol. 3, No. 4, 2017, pp. 651–664.
29. J.Szymczak, T. Rębiś, J. Mielcarek, and M. Kryjewski, "Electrochemical, spectrochemical and catalytical properties of cobalt (II) phthalocyanine regioisomers studies," *Synth. Met.*, Vol. 283, 2022, Article 116971.
30. H. J. Li *et al.*, "A Mini Review on Polymer Dots: Synthesis, Properties and Optical Applications," *Chin. J. Lumin.*, Vol. 42, No. 6, 2021, pp. 774–792.
31. A.I. Costa, P. D. Barata, B. Moraes, and J. V. Prata, "Carbon Dots from Coffee Grounds: Synthesis, Characterization, and Detection of Noxious Nitroanilines," *Chemosensors*, Vol. 10, No. 3, 2022, Art. 113.
32. P.Roy, P. C. Chen, A. P. Periasamy, Y.-N. Chen, and H.-T. Chang, "Photoluminescent carbon nanodots: synthesis, physicochemical properties and analytical applications," *Mater. Today*, Vol. 18, No. 8, 2015, pp. 447–458.
33. S.Tajik *et al.*, "Carbon and graphene quantum dots: A review on syntheses, characterization, biological and sensing applications for neurotransmitter determination," *RSC Adv.*, Vol. 10, No. 26, 2020, pp. 15406–15429.
34. H. Shabbir, E. Csapó, and M. Wojnicki, "Carbon Quantum Dots: The Role of Surface Functional Groups and Proposed Mechanisms for Metal Ion Sensing," *Inorganics*, Vol. 11, No. 6, 2023, Article 262.
35. K. J. Mintz, Y. Zhou, and R. M. Leblanc, "Recent development of carbon quantum dots regarding their optical properties, photoluminescence mechanism, and core structure," *Nanoscale*, Vol. 11, No. 11, 2019, pp. 4634–4652.

DEMODULACIÓN POLARIMÉTRICA DE LA MATRIZ DE MUELLER BASADA EN EL DOMINIO DE FOURIER COMPLEJO

Natalia Gaeta-V[1], Luis Torres-M[1], Joel Cervantes-L[1], Jorge Luis Flores-Núñez[1], Geliztle A. Parra-Escamilla[2] y David I. Serrano-García[1]

[1]Departamento de Electro-Fotónica, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara. [2]Departamento de Ciencias Computacionales, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara.
natalia.gaeta5476@alumnos.udg.mx

RESUMEN

La medición de la matriz de Mueller es esencial en áreas como la microscopía, la caracterización de materiales y el sensado remoto. A partir de la matriz de Mueller completa es posible recuperar tres parámetros polarimétricos fundamentales: diatenuación, depolarización y retardancia. La diatenuación describe la atenuación diferencial de la luz en función de su estado de polarización; la depolarización cuantifica la pérdida de dicho estado al interactuar con una muestra; y la retardancia representa el cambio de fase introducido entre componentes ortogonales del campo eléctrico. En el contexto de la microscopía biológica, se ha reportado que la depolarización constituye una métrica alternativa y complementaria para la caracterización de tejido cancerígeno, mientras que la combinación de los parámetros de diatenuación y retardancia ha cobrado relevancia recientemente en aplicaciones de sensado remoto en el rango visible. En este trabajo se propone una metodología alternativa para la recuperación de la matriz de Mueller completa, basada en la rotación de dos retardadores lineales y en el desarrollo de un algoritmo de demodulación basado en coeficientes de Fourier complejos. A diferencia del enfoque tradicional, que expresa la intensidad medida como una sumatoria de funciones seno y coseno, el método propuesto implementa directamente la transformada de Fourier de la señal modulada y utiliza su representación en términos de coeficientes complejos para extraer la información polarimétrica. Adicionalmente, se incorporan parámetros de calibración asociados a los ángulos iniciales de los polarizadores lineales y a la retardancia efectiva de los retardadores lineales, lo que permite compensar desalineaciones y errores instrumentales. Los resultados experimentales muestran una mejora en la precisión y estabilidad del proceso de recuperación de la matriz de Mueller en comparación con el algoritmo estándar basado en series de seno–coseno. La validación del algoritmo se realizó mediante la implementación experimental de un sistema puntual con un láser de 520 nm y un fotodetector, para evaluar variaciones de retardancia lineal mediante una celda de cristal líquido, así como configuraciones de referencia con aire y la rotación de un polarizador lineal. En conjunto, los resultados confirman la viabilidad del enfoque propuesto como una alternativa analítica y computacionalmente eficiente para la recuperación de la matriz de Mueller, con potencial aplicación en sistemas polarimétricos puntuales e imagenológicos.

INTRODUCCIÓN

Los seres humanos, por naturaleza, tenemos poca apreciación de la polarización en nuestro entorno. El ojo humano apenas puede percibir la polarización. Para medir, visualizar y utilizar la información de polarización se necesitan los polarímetros [1]. El estado de polarización de la luz es fundamental en óptica y fotónica [2]. Su medición ha contribuido en avances físicos, químicos y biológicos fundamentales y ha proporcionado herramientas esenciales de detección, diagnóstico, análisis y metrología en numerosas aplicaciones. Esto incluye la industria química, farmacéutica, biomédica y de semiconductores. Algunas de las muestras de gran interés incluyen superficies, películas delgadas, elementos ópticos, sistemas ópticos, paisajes, muestras biológicas e industriales [3]. Las técnicas de imagen óptica son herramientas no invasivas, sin contacto y de alta resolución, ampliamente utilizadas en estudios biomédicos. Las técnicas de imagen de polarización son sensibles a los cambios microestructurales en los tejidos y, por lo tanto, pueden considerarse herramientas potenciales y sin marcadores para el diagnóstico biomédico. En el campo de la

teledetección, los generadores de imágenes de polarización requieren una calibración precisa en el laboratorio mediante un estado polarizado de entrada específico, esta calibración afecta directamente la precisión de la medición [4].

La matriz de Mueller proporciona un enfoque sistemático para representar las propiedades polarimétricas de una muestra: la diatenuación, depolarización y retardancia. Cada uno de estos parámetros se asocia a propiedades físicas de la muestra, por ejemplo: la diatenuación circular y lineal puede asociarse con la medición de la dispersión y la quiralidad; la retardancia circular es de ayuda para mediciones de glucosa; la birrefringencia se puede asociar a análisis de estrés y a partir de las propiedades de la depolarización se puede realizar diagnóstico de cáncer [5-8].

Esta matriz tiene una definición simple; es una matriz $\mathbf{4} \times \mathbf{4}$ que relaciona un conjunto de parámetros de Stokes incidentes, $\boldsymbol{S_{in}}$, con los parámetros salientes, $\boldsymbol{S_{out}}$, para cualquier muestra.

Un polarímetro de la matriz de Mueller mide todas las propiedades de la muestra, así como la matriz de Mueller de todo lo que está posicionado entre el generador de estados de polarización (PSG) y el analizador de estados de polarización (PSA), esta es la región de polarización crítica. El polarímetro del doble retardador rotatorio es uno de los polarímetros de Mueller más comunes. Esta configuración polarimétrica está basada en un concepto propuesto originalmente por Azzam. El polarímetro tiene cinco secciones, la fuente, la óptica polarizadora (polarizador lineal fijo y retardador lineal rotado ($\boldsymbol{\theta}$)), la muestra, la óptica analizadora (polarizador lineal fijo y retardador lineal rotado ($\mathbf{5}\boldsymbol{\theta}$)) y el detector. En la configuración más común, los polarizadores son paralelos y los retardadores rotan en incrementos de 5:1, esta relación codifica los 16 elementos de la matriz de Mueller en amplitudes y fases de 12 frecuencias distintas en la señal detectada [4].

Uno de los principales desafíos en el diseño de algoritmos de demodulación para el polarímetro de doble retardador rotatorio (DRR) radica en el tratamiento preciso de los parámetros de calibración asociados a ambos retardadores y su sincronización angular. En este trabajo abordamos esta problemática mediante una formulación basada en la transformada teórica de Fourier, la cual permite descomponer la señal medida en armónicos bien definidos, logrando así una separación clara entre las contribuciones instrumentales y las propiedades intrínsecas de la muestra, lo que facilita su implementación y robustez en aplicaciones experimentales.

TRATAMIENTO TEÓRICO Y ALGORITMO DE DEMODULACIÓN

Implementamos nuestra propuesta para el sistema del doble retardador rotatorio con una relación de rotación de 5:1, ver Figura 1. En este caso nuestra meta es recuperar los coeficientes de la matriz de Mueller de la muestra, $\boldsymbol{M_{muestra}}$, obtenida como

$$\boldsymbol{S_{out}} = \boldsymbol{LP}(\mathbf{0}+\boldsymbol{\varepsilon_5})\boldsymbol{LR}\left(\mathbf{5}\boldsymbol{\theta}+\boldsymbol{\varepsilon_4},\frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{2}}+\boldsymbol{\varepsilon_2}\right)\boldsymbol{M_{muestra}}\boldsymbol{LR}\left(\boldsymbol{\theta}+\boldsymbol{\varepsilon_3},\frac{\boldsymbol{\pi}}{\mathbf{2}}+\boldsymbol{\varepsilon_1}\right)\boldsymbol{LP}(\mathbf{0})\boldsymbol{S_{in}} \quad (1)$$

donde $\boldsymbol{S_{out}}$ es el vector de Stokes de salida, $\boldsymbol{S_{in}}$ es el vector de Stokes de la fuente de iluminación, $\boldsymbol{LP}$ indica un polarizador lineal, $\boldsymbol{LR}(\boldsymbol{\theta})$ indica un retardador lineal dependiente a la orientación y $\boldsymbol{M_{muestra}}$ es la matriz de la muestra a ser determinada.

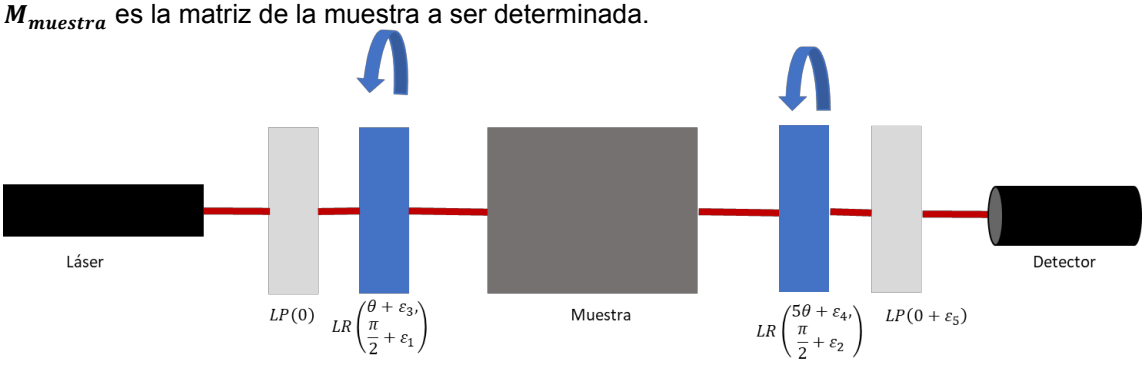


Figura 1. Muestra el polarímetro del doble retardador rotatorio. Se consideran parámetros de calibración tales como alineación azimutal inicial $(\boldsymbol{\varepsilon_3}, \boldsymbol{\varepsilon_4}, \boldsymbol{\varepsilon_5})$ y errores de retardancia $(\boldsymbol{\varepsilon_1}, \boldsymbol{\varepsilon_2})$.

La señal detectada expresada en series de Fourier es:

$$\boldsymbol{I(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{12} (a_n \cos(2n\theta) + b_n \sin(2n\theta))} \quad (2)$$

Después de aplicar la transformada de Fourier de la intensidad, obtenemos la representación en términos de coeficientes complejos con:

$$\boldsymbol{\hat{I}_{det}(\omega) = \sum_{n=-N}^{N} C_n \delta(\omega + n)} \quad (3)$$

La Tabla 1 presenta el cálculo teórico de los parámetros de Mueller para el polarímetro del doble retardador rotario considerando los coeficientes complejos de Fourier y sus parámetros de calibración correspondientes. Los tres elementos polarimétricos tienen errores en su alineación azimutal inicial relacionados al primer polarizador. Estos errores se muestran como $\boldsymbol{\varepsilon_3}, \boldsymbol{\varepsilon_4}$ y $\boldsymbol{\varepsilon_5}$. Los errores de retardancia se muestran como $\boldsymbol{\delta_1}$ y $\boldsymbol{\delta_2}$ donde $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ y $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ son desviaciones de cuarto de onda. $\boldsymbol{Re}$ representa la parte real e $\boldsymbol{Im}$ la parte imaginaria.

Tabla 1. Parámetros de Mueller obtenidos con el método propuesto.

Parámetro	Demodulación calibrada
$\boldsymbol{m_{11}}$	$\boldsymbol{\left(\frac{4C_0}{S_0}\right) - \left(\frac{1}{4}\right)(-cos(2\varepsilon_5)(2m_{21} + m_{22} - m_{22}\,sin(\varepsilon_1))(-1 + sin(\varepsilon_2))) - \left(\frac{1}{2}\right)(m_{12} + cos(\varepsilon_5)(m_{32} - (2m_{31} + m_{32})\,sin(\varepsilon_2))\,sin(\varepsilon_5) + sin(\varepsilon_1)(-m_{12} + m_{32}\,cos(\varepsilon_5)\,(-1 + sin(\varepsilon_2))\,sin(\varepsilon_5)) + m_{31}\,sin(2\varepsilon_5))}$
$\boldsymbol{m_{12}}$	$\boldsymbol{Im\left[\left(\frac{-1}{2}\right)\left(\left(\frac{16e^{-4i\varepsilon_3}C_2}{(S_0)(1+sin(\varepsilon_1))}\right)(4(1+sin(\varepsilon_1)))\left(\frac{1}{e^{-i\varepsilon_1}((i+e^{i\varepsilon_1})^2)}\right) - (im_{22} + m_{23})\,cos(2\varepsilon_5)\,(-1 + sin(\varepsilon_2)) - (im_{32} + m_{33})(-1 + sin(\varepsilon_2))\,sin(2\varepsilon_5)\right)\right]}$
$\boldsymbol{m_{13}}$	$\boldsymbol{Re\left[\left(\frac{-1}{2}\right)\left(\left(\frac{16e^{-4i\varepsilon_3}C_2}{(S_0)(1+sin(\varepsilon_1))}\right)(4(1+sin(\varepsilon_1)))\left(\frac{1}{e^{-i\varepsilon_1}((i+e^{i\varepsilon_1})^2)}\right) - (im_{22} + m_{23})\,cos(2\varepsilon_5)\,(-1 + sin(\varepsilon_2)) - (im_{32} + m_{33})(-1 + sin(\varepsilon_2))\,sin(2\varepsilon_5)\right)\right]}$
$\boldsymbol{m_{14}}$	$\boldsymbol{\frac{8ie^{-2i\varepsilon_3}C_1\,sec(\varepsilon_1)}{S_0} - \left(-\frac{1}{2}cos(2\varepsilon_5)\,(-1 + sin(\varepsilon_2))\right)m_{24} - (-cos(\varepsilon_5)\,(-1 + sin(\varepsilon_2))\,sin(\varepsilon_5))m_{34}}$
$\boldsymbol{m_{21}}$	$\boldsymbol{Re\left[\frac{32ie^{i(\varepsilon_2 - 4\varepsilon_4 + 2\varepsilon_5)}C_{10}}{(i+e^{i\varepsilon_2})^2 S_0} + \frac{1}{2}(-m_{22} + im_{32})(1 - sin(\varepsilon_1))\right]}$
$\boldsymbol{m_{22}}$	$\boldsymbol{Re\left[\frac{-128e^{i(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 4(\varepsilon_3 + \varepsilon_4) + 2\varepsilon_5)}(C_{12} + e^{8i\varepsilon_3}C_8)}{(((i+e^{i\varepsilon_1})^2)((i+e^{i\varepsilon_2})^2)S_0)}\right]}$
$\boldsymbol{m_{23}}$	$\boldsymbol{Im\left[\frac{-256e^{i(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + 4\varepsilon_3 - 4\varepsilon_4 + 2\varepsilon_5)}C_8}{(i+e^{i\varepsilon_1})^2(i+e^{i\varepsilon_2})^2 S_0} - m_{22} + im_{32}\right]}$
$\boldsymbol{m_{24}}$	$\boldsymbol{Re\left[\frac{-128e^{i(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2\varepsilon_3 - 4\varepsilon_4 + 2\varepsilon_5)}C_{11}}{(1+e^{2i\varepsilon_1})(i+e^{i\varepsilon_2})^2 S_0}\right]}$

m_{31}	$Im\left[-\frac{32ie^{i(\varepsilon_2-4\varepsilon_4+2\varepsilon_5)}C_{10}}{(i+e^{i\varepsilon_2})^2S_0}-\frac{1}{2}(m_{22}-im_{32})(-1+sin(\varepsilon_1))\right]$
m_{32}	$Im\left[\frac{-128e^{i(\varepsilon_1+\varepsilon_2-4(\varepsilon_3+\varepsilon_4)+2\varepsilon_5)}(C_{12}+e^{8i\varepsilon_3}C_8)}{(((i+e^{i\varepsilon_1})^2)((i+e^{i\varepsilon_2})^2)S_0)}\right]$
m_{33}	$Re\left[\frac{-256e^{i(\varepsilon_1+\varepsilon_2+4\varepsilon_3-4\varepsilon_4+2\varepsilon_5)}C_8}{(i+e^{i\varepsilon_1})^2(i+e^{i\varepsilon_2})^2S_0}-m_{22}+im_{32}\right]$
m_{34}	$Im\left[\frac{128e^{i(\varepsilon_1+\varepsilon_2-2\varepsilon_3-4\varepsilon_4+2\varepsilon_5)}C_{11}}{(1+e^{2i\varepsilon_1})(i+e^{i\varepsilon_2})^2S_0}\right]$
m_{41}	$\frac{-8ie^{-2i(\varepsilon_4-\varepsilon_5)}C_5\,sec(\varepsilon_2)}{S_0}-\frac{1}{2}(1-sin(\varepsilon_1))m_{42}$
m_{42}	$Re\left[\frac{128e^{i(\varepsilon_1+\varepsilon_2+4\varepsilon_3-2\varepsilon_4+2\varepsilon_5)}C_3}{(i+e^{i\varepsilon_1})^2(1+e^{2i\varepsilon_2})S_0}\right]$
m_{43}	$Im\left[\frac{128e^{i(\varepsilon_1+\varepsilon_2+4\varepsilon_3-2\varepsilon_4+2\varepsilon_5)}C_3}{(i+e^{i\varepsilon_1})^2(1+e^{2i\varepsilon_2})S_0}\right]$
m_{44}	$\frac{16e^{-2i(\varepsilon_3+\varepsilon_4-\varepsilon_5)}C_6\,sec(\varepsilon_1)\,sec(\varepsilon_2)}{S_0}$

Como puede notarse, los parámetros de calibración deben medirse de antemano. En este caso hicimos una medición sin muestra en el polarímetro y consideramos la matriz de la muestra como la matriz identidad. El cálculo de los parámetros de calibración se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de calibración sin muestra.

Parámetro	Ecuación
ε_1	$2\tan^{-1}\left(\frac{C_8C_{-8}}{C_{10}C_{-10}}\right)^{1/4}-\frac{\pi}{2}$
ε_2	$2\tan^{-1}\left(\frac{C_8C_{-8}}{C_2C_{-2}}\right)^{1/4}-\frac{\pi}{2}$
ε_3	$Angle\left[\frac{-C_6}{C_4}\right]$
ε_4	$Angle\left[\frac{e^{8i\varepsilon_3}C_{-2}}{C_2}\right]$
ε_5	$Angle\left[\frac{e^{4i\varepsilon_5}e^{4i\varepsilon_3}C_4}{C_{-4}}\right]$
δ_1	$\varepsilon_1+\frac{\pi}{2}$
δ_2	$\varepsilon_2+\frac{\pi}{2}$
S_0	$\sqrt{\frac{256C_{-4}C_4}{\sin\left(\varepsilon_1+\frac{\pi}{2}\right)^2\sin\left(\varepsilon_2+\frac{\pi}{2}\right)^2}}$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para implementar el polarímetro de la matriz de Mueller, diseñamos un sistema óptico compuesto de un generador de estados de polarización (PSG) y un módulo de detección de estados de polarización (PSD). La configuración se muestra en la Figura 2, con sus componentes organizados en dos secciones resaltadas por líneas punteadas rojas. La primera sección incluye un láser verde (ZhonNa) con un pico de emisión en 520 nm. La luz emitida pasa a través de un polarizador lineal (Thorlabs-WP25M-VIS) y una placa de cuarto de onda (Thorlabs-WPQ10E-532), montada en una

montura de rotación electrónica (Thorlabs-ELL14K), para generar la dependencia al ángulo de rotación $\boldsymbol{\theta}$. La segunda sección consiste de una montura de rotación electrónica a una relación de $\boldsymbol{5\theta}$ (Thorlabs-ELL14K), un polarizador lineal actúa como referencia. Después de la modulación, el rayo se enfoca en un fotodetector de silicio (Thorlabs-PM16-121), el cual es sensible en el rango de $\boldsymbol{400 - 1700}$ nm. Se agregaron monturas de desplazamiento manual para asegurar la precisión en la alineación de los elementos ópticos.

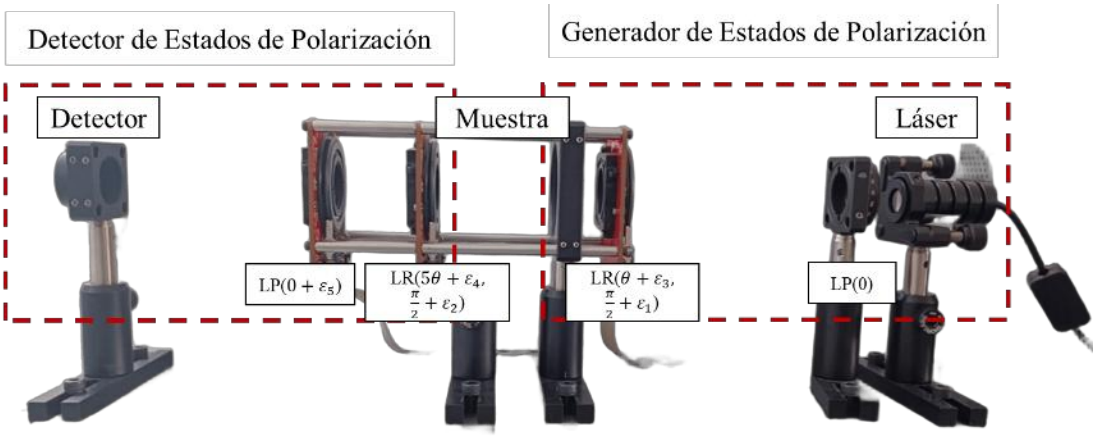


Figura 2. Configuración experimental usada para implementar el polarímetro del doble retardador rotatorio. La primera sección (derecha) corresponde al PSG. La segunda sección (izquierda) contiene el módulo PSD.

Para validar nuestra aproximación, realizamos dos implementaciones experimentales. El primer experimento mide la intensidad detectada y evalúa el perfil de la intensidad detectada usando el polarímetro del doble retardador rotatorio. El segundo experimento recupera la matriz de Mueller del aire y la compara con la matriz identidad. Para evaluar cuantitativamente la concordancia entre los resultados experimentales y teóricos, calculamos el error cuadrático medio (RMS) entre los datos medidos y los datos modelados. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.

El primer resultado experimental se presenta en la Figura 3. Medimos la intensidad detectada (curva roja) y la comparamos con los valores simulados teóricos (línea azul) y calibrados (puntos negros). La intensidad teórica se calculó usando los modelos de Stokes-Mueller. Como se muestra en la Figura 3, el modelo calibrado exhibe mejor concordancia con los datos experimentales, confirmando la efectividad del proceso de calibración.

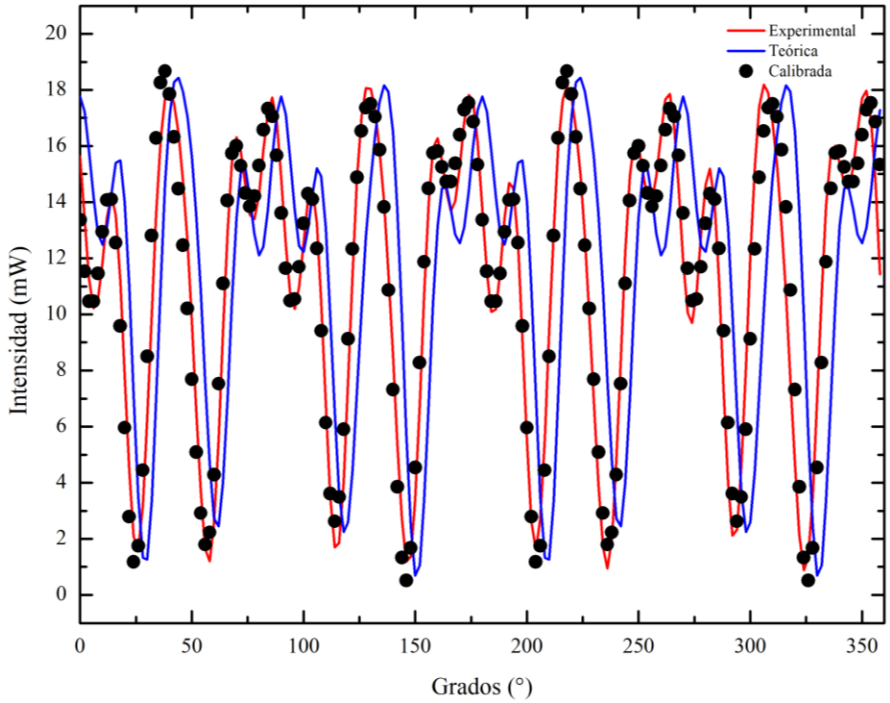


Figura 3. Comparación entre la intensidad experimental y teórica. Se muestra la intensidad experimental (rojo), intensidad teórica sin calibración (azul) e intensidad teórica con calibración (puntos negros).

La Tabla 3 muestra la matriz de Mueller del aire obtenida con el algoritmo de demodulación y la matriz teórica.

Tabla 3. Matriz de Mueller del aire recuperada con el algoritmo de demodulación y matriz teórica.

Matriz de Mueller teórica del aire	Matriz de Mueller experimental del aire
$\boldsymbol{M_{aire}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$	$\boldsymbol{M_{aire}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0.0352} & \mathbf{-0.0054} & \mathbf{0.0126} \\ \mathbf{0.0360} & \mathbf{0.8185} & \mathbf{0.0517} & \mathbf{0.0389} \\ \mathbf{-0.0202} & \mathbf{0.0028} & \mathbf{0.9700} & \mathbf{0.1527} \\ \mathbf{-0.0040} & \mathbf{0.0151} & \mathbf{-0.0870} & \mathbf{0.9247} \end{bmatrix}$

Para comparar cuantitativamente el desempeño de la configuración del polarímetro, calculamos el error medio cuadrático (RMS) para las mediciones de intensidad y matriz de Mueller. La Tabla 4 presenta los valores RMS entre la intensidad experimental y la calibrada teórica, así como entre la matriz de Mueller medida y teórica estimados usando un ajuste de mínimos cuadrados.

Tabla 4. Valores de error RMS. La primera columna reporta el error RMS entra la intensidad detectada y teórica basada en la matriz de Mueller calibrada. La segunda columna reporta el error RMS entre la matriz de Mueller del aire y la matriz identidad.

Intensidad (RMS)	Matriz de Mueller (RMS)
$\mathbf{0.0013}$	$\mathbf{0.5091}$

Para validar la medición propuesta, se seleccionó una celda comercial de cristal líquido (Thorlabs-LCC1223-A) como muestra (Figura 4 a)). La respuesta del dispositivo fue caracterizada utilizando el método de polarizadores cruzados para determinar el rango de voltaje de operación. Después, se midió la matriz de Mueller en esta región, finalmente, se aplicó la descomposición de Lu-Chipman [6] para extraer la retardancia lineal como función del voltaje aplicado.

La Figura 4 b) muestra la intensidad transmitida cuando el voltaje varía de $\mathbf{0}\boldsymbol{V}$ a $\mathbf{10}\boldsymbol{V}$. En este rango no se observa un comportamiento lineal, particularmente por debajo de los $\mathbf{3}\boldsymbol{V}$, donde la respuesta exhibe fluctuaciones abruptas. Para aislar una región de operación, el voltaje se restringió a un intervalo entre $\mathbf{3.5}\boldsymbol{V}$ y $\mathbf{5}\boldsymbol{V}$. Como se muestra en la Figura 4 c), en este rango la intensidad varía suavemente y casi linealmente, indicando una región de ajuste de retardo estable sin saturación o discontinuidades. Este intervalo de voltaje se seleccionó como la región lineal de operación de la LCD para posteriores mediciones de la matriz de Mueller.

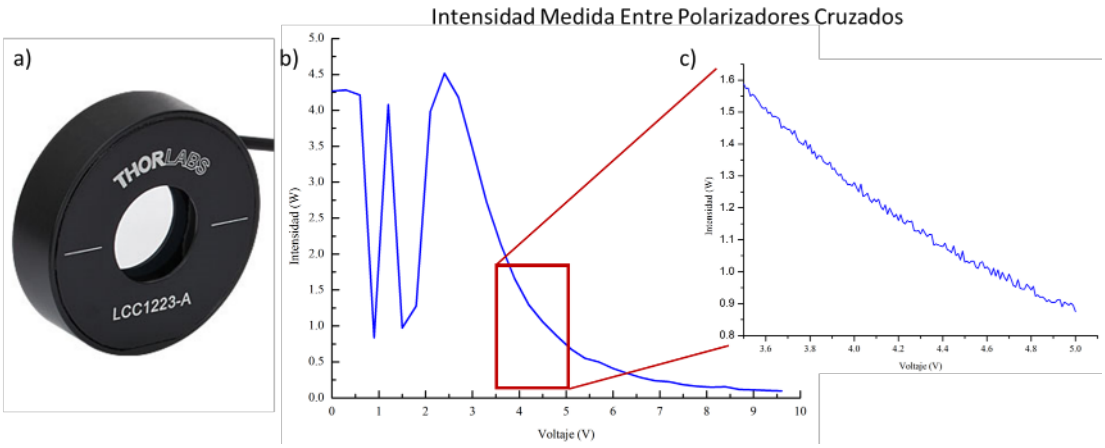


Figura 4. Respuesta de intensidad de la celda de cristal líquido colocada entre polarizadores cruzados en función del voltaje aplicado. a) Celda de cristal utilizada. b) Variación de la intensidad de $\mathbf{0}\boldsymbol{V}$ a $\mathbf{10}\boldsymbol{V}$. c) Vista ampliada del intervalo de $\mathbf{3.5}\boldsymbol{V}$ a $\mathbf{5}\boldsymbol{V}$.

Una vez establecido el rango de voltaje de operación, se midió la matriz de Mueller de la celda como una función de voltaje entre $\mathbf{3.5}\boldsymbol{V}$ y $\mathbf{5}\boldsymbol{V}$. La Figura 5 a) muestra los elementos de la matriz de Mueller normalizados obtenidos experimentalmente para la LCD. Cada subgráfica corresponde al elemento de Mueller $\boldsymbol{M_{ij}}$, graficado como una función del voltaje aplicado. Como se espera de un retardador linear controlado por voltaje, sólo los elementos asociados con la birrefringencia lineal exhiben una variación continua. En contraste, los elementos relacionados a la diatenuación y depolarización permanecen cercanos a cero. El comportamiento periódico observado en ciertos elementos fuera de la diagonal corresponde a la modulación de retardo de fase inducida por la orientación del cristal líquido. Estos resultados confirman que, dentro del intervalo de voltaje seleccionado, la celda se comporta principalmente como un retardador de fase variable con efectos de depolarización y diatenueación insignificantes.

Para cuantificar la modulación de fase introducida por la celda de cristal líquido, la descomposición polar de Lu-Chipman se aplicó a las matrices de Mueller medidas. Esta descomposición separa los efectos de polarización en las componentes de diatenuación, depolarización y retardancia. La Figura 5 b) muestra la retardancia como una función del voltaje aplicado entre $\mathbf{3.7}\boldsymbol{V}$ y $\mathbf{4.2}\boldsymbol{V}$. Se observa un incremento suave y monótono en la retardancia, confirmando que la celda de cristal líquido se comporta como un retardador de fase variable controlable en esta región.

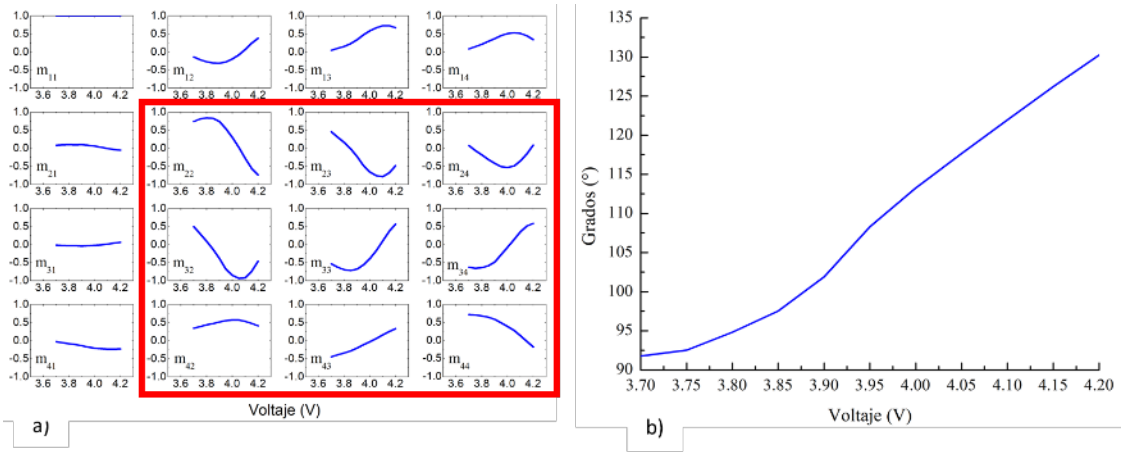


Figura 5. a) Elementos de la matriz de Mueller de la celda de cristal líquido normalizados. b) Retardancia lineal extraída de la matriz de Mueller usando el método de descomposición de Lu-Chipman.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología alterna para recuperar la matriz de Mueller analizando la intensidad detectada como una función de la configuración del sistema óptico y el estado de polarización. Con dicha configuración se desarrolló un algoritmo basado en la demodulación de Fourier que permitió calcular teóricamente la intensidad detectada, la matriz de Mueller y la retardancia. Para mejorar la precisión, se desarrolló un proceso de calibración incorporando correcciones en los ángulos iniciales y retardancias de los polarizadores y retardadores lineales. Se comprobó la similitud entre los datos teóricos y experimentales. Finalmente, se utilizó el error RMS como métrica para cuantificar el desarrollo de la configuración.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. A. Chipman, W. T. Lam, G. Young, “Polarized Light and Optical Systems,” CRC Press, Boca Raton, 1st ed., 2019.
2. C. Beck, “The calibration of the vector polarimeter POLIS,” arXiv preprint, arXiv:1308.4954, 2013.
3. R. M. A. Azzam, “Stokes-vector and Mueller-matrix polarimetry,” J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 33, No. 7, 2016, pp. 1396–1408.
4. H. He, R. Liao, N. Zeng, P. Li, Z. Chen, X. Liu, H. Ma, “Mueller matrix polarimetry—an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimens,” J. Lightwave Technol., Vol. 37, No. 11, 2018, pp. 2534–2548.
5. E. A. Sornsin, R. A. Chipman, “Visible Mueller matrix spectropolarimetry,” Proc. SPIE, Vol. 3121, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing, October 3, 1997.
6. D. H. Goldstein, “Polarized Light,” CRC Press, Boca Raton, 3rd ed., 2011.
7. T. Novikova, A. Pierangelo, A. de Martino, A. Benali, P. Validire, “Polarimetric imaging for cancer diagnosis and staging,” Opt. Photonics News, October 2012, pp. 26.
8. K. Bhattacharyya, D. I. Serrano-García, Y. Otani, “Accuracy enhancement of dual rotating Mueller matrix imaging polarimeter by diattenuation and retardance error calibration approach,” Opt. Commun., Vol. 392, 2017, pp. 48–53.

MONITOREO EN TIEMPO REAL DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL CELULAR MEDIANTE MICROSCOPÍA DE IMÁGENES SENSIBLES A LA POLARIZACIÓN

Emilio Z. Leyva-Leyva, Gabriel Castillo-Estrada, Joel Cervantes-L, Geliztle A. Parra-Escamilla, Paulina Osuna-Carrasco, Diana P. Ramírez-Martínez y David I. Serrano-García.

Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.
emilio.leyva7322@alumnos.udg.mx

RESUMEN

La microscopía sensible a la polarización permite analizar anisotropías estructurales en muestras biológicas sin necesidad de marcadores fluorescentes. En este trabajo se implementó un sistema experimental basado en un microscopio invertido Olympus IX50 acoplado a una cámara de polarización pixelada para el monitoreo celular en tiempo real. El sistema óptico fue caracterizado mediante un patrón USAF birrefringente para evaluar la respuesta polarimétrica y la resolución espacial. Posteriormente, se realizaron adquisiciones polarimétricas de células HeLa para analizar variaciones estructurales mediante parámetros polarimétricos. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de las técnicas de imágenes sensibles a la polarización para el monitoreo no invasivo y libre de marcadores de la dinámica estructural celular.

INTRODUCCIÓN

La polarización de la luz contiene información relevante sobre las propiedades estructurales y ópticas de las muestras biológicas. Las técnicas de imágenes sensibles a la polarización permiten detectar características anisotrópicas relacionadas con la morfología celular, la birrefringencia y la organización intracelular sin necesidad de marcadores fluorescentes, proporcionando mecanismos de contraste adicionales a los obtenidos mediante microscopía convencional basada en intensidad. Las técnicas de microscopía de fluorescencia suelen requerir marcadores exógenos capaces de inducir fototoxicidad, fotoblanqueo y alteraciones en el comportamiento celular. En contraste, las imágenes polarimétricas libres de marcadores representan una alternativa no invasiva para el análisis en tiempo real de la dinámica estructural celular. El desarrollo de cámaras de polarización pixeladas ha permitido adquirir múltiples estados de polarización de forma simultánea mediante arreglos de micro-polarizadores integrados directamente sobre el sensor. Estas capacidades hacen de la microscopía polarimétrica una herramienta prometedora para aplicaciones de óptica biomédica y análisis celular avanzado.

En este trabajo se implementó un sistema de microscopía sensible a la polarización basado en un microscopio invertido Olympus IX50 acoplado a una cámara de polarización pixelada. El sistema fue caracterizado utilizando un patrón USAF birrefringente y posteriormente aplicado al análisis polarimétrico de células HeLa.

TRATAMIENTO TEORICO

Las imágenes adquiridas fueron procesadas mediante un enfoque basado en los parámetros de Stokes para extraer información polarimétrica de las muestras biológicas [1]. La cámara pixelada registra simultáneamente cuatro mediciones de intensidad correspondientes a las diferentes orientaciones de polarización lineal de -45°, 0°, 45° y 90°, las cuales se denotan como I_{-45}, I_0, I_{45} e I_{90}, respectivamente. A partir de estas componentes de intensidad, se calcularon los primeros tres parámetros de Stokes $(S_0, S_1\ y\ S_2)$, mediante,

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_{90} \\ S_1 &= I_0 - I_{90}. \end{aligned} \tag{1}$$

$$S_2 = I_{45} - I_{-45}$$

Donde S_0 representa la intensidad total de la luz, mientras que S_1 y S_2 describen las contribuciones de la polarización lineal horizontal/vertical y diagonal, respectivamente. Una vez obtenidos estos vectores, se determinó el Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP) a través de,

$$DoLP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{S_0}$$
$$AoLP = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \quad (2)$$

El parámetro DoLP permite cuantificar la proporción de luz que se encuentra linealmente polarizada tras interactuar con la muestra, mientras que el AoLP define la orientación dominante de dicha polarización. Finalmente, se aplicó un filtro gaussiano y un algoritmo de remoción de fondo sobre los mapas polarimétricos resultantes; este procedimiento permitió reducir el ruido de alta frecuencia y optimizar el contraste visual de las estructuras intracelulares asociadas a las muestras biológicas.

IMPLEMENTACION EXPERIMENTAL

La Figura 1 muestra el sistema experimental implementado para la adquisición de imágenes polarimétricas de muestras biológicas. El montaje se basa en un microscopio invertido Olympus IX50 [1] modificado mediante la incorporación de un polarizador lineal entre la fuente de iluminación y el condensador. La muestra biológica se coloca sobre la platina del microscopio y la imagen formada es capturada a través del puerto de salida por una cámara de polarización pixelada CS505MUP1 (Thorlabs) [2]. Este sensor integra una matriz de micropolarizadores con diferentes orientaciones lineales, permitiendo la adquisición simultánea de información polarimétrica en una sola captura. La configuración propuesta posibilita el análisis de propiedades ópticas relacionadas con la polarización de la luz lineal, manteniendo la capacidad de observación en tiempo real y sin requerir marcadores o fluoróforos que alteren la estructura de la muestra.

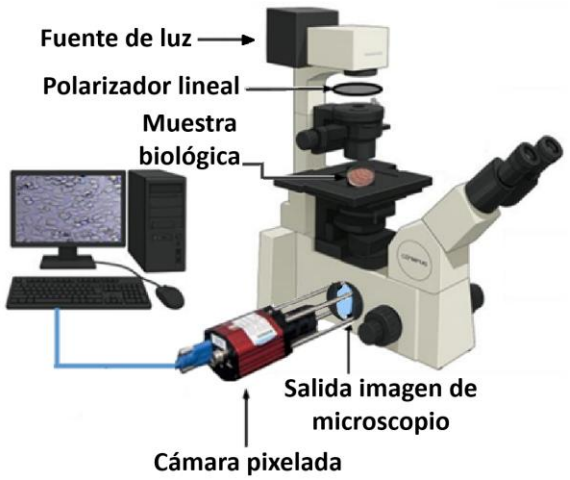


Figura 1. Sistema experimental de microscopía polarimétrica basado en un microscopio invertido Olympus IX50. Un polarizador lineal se coloca en la trayectoria de iluminación y una cámara de polarización pixelada CS505MUP1 se acopla al puerto de salida para la adquisición simultánea de información polarimétrica de muestras biológicas.

La Figura 2 muestra la cámara de polarización pixelada utilizada en el sistema experimental y la arquitectura interna de su sensor polarimétrico. El dispositivo incorpora una matriz de micropolarizadores lineales orientados a 0°, 45°, 90° y −45°, distribuidos periódicamente sobre el arreglo de fotodiodos. Además, cada elemento detector se encuentra asociado a una microlente que

mejora la eficiencia de captación de luz. Esta configuración permite registrar simultáneamente cuatro componentes de polarización lineal de la escena observada, eliminando la necesidad de elementos mecánicos de modulación o adquisiciones secuenciales. A partir de estas mediciones es posible calcular los parámetros de Stokes y obtener mapas polarimétricos de la muestra biológica en tiempo real.

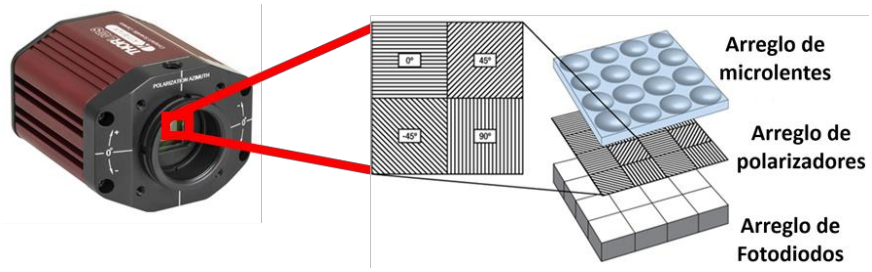


Figura 2. Cámara pixelada de polarización a la izquierda y representación de la estructura del sensor polarimétrico con una matriz de micropolarizadores orientados a 0°, 45°, 90° y −45° integrados sobre el sensor de imagen [2].

La Figura 3 muestra el flujo de procesamiento empleado para obtener los parámetros polarimétricos de las muestras biológicas utilizando un patrón USAF birrefringente mostrando el grupo 5 elementos 1 a 6 correspondiente a un espacio de 78.15 a 43.85 micras respectivamente utilizando un objetivo de 10x. En la etapa (a), la cámara de polarización pixelada registra simultáneamente cuatro imágenes de intensidad correspondientes a las orientaciones de polarización lineal de −45°, 0°, 45° y 90°. Estas imágenes constituyen la información primaria utilizada para el análisis polarimétrico. Posteriormente, en la etapa (b), las cuatro componentes de intensidad son empleadas para calcular los parámetros de Stokes normalizados (S_0), (S_1/S_0) y (S_2/S_0). El parámetro (S_0) representa la intensidad total de la luz detectada, mientras que los últimos dos contienen la información asociada al estado de polarización lineal de la muestra. A partir de estos parámetros, en la etapa (c) se calculan el Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP). El DoLP permite cuantificar la proporción de luz linealmente polarizada presente en cada píxel, mientras que el AoLP describe la orientación predominante de dicha polarización. En ambos mapas puede observarse la presencia de variaciones espaciales asociadas tanto a la estructura de la muestra como a contribuciones de iluminación no uniforme y efectos de fondo. Finalmente, en la etapa (d), se aplica un procedimiento de filtrado y remoción de fondo sobre los mapas de AoLP y DoLP. Este procesamiento reduce las componentes de baja frecuencia asociadas a gradientes de iluminación y variaciones del sistema óptico, mejorando el contraste de las estructuras presentes en la muestra y facilitando la identificación de detalles de interés para el análisis polarimétrico.

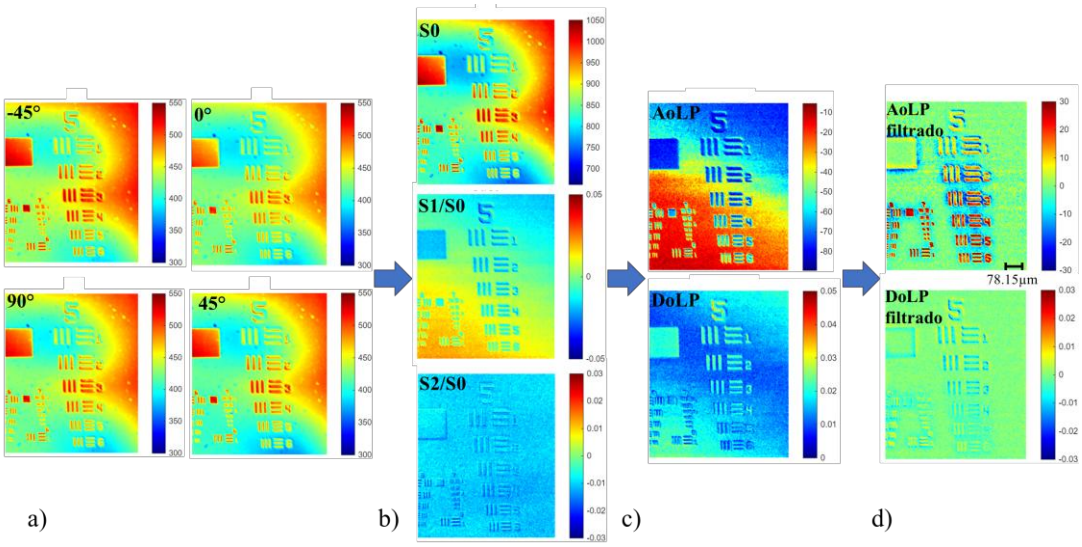


Figura 3. Flujo de procesamiento polarimétrico empleado para la obtención de los parámetros de polarización. (a) Imágenes de intensidad adquiridas por la cámara de polarización pixelada para las orientaciones de −45°, 0°, 45° y 90°. (b) Cálculo de los parámetros de Stokes normalizados (S_0), (S_1/S_0) y (S_2/S_0). (c) Obtención de los mapas del Ángulo de Polarización Lineal (AoLP) y del Grado de Polarización Lineal (DoLP). (d) Aplicación de filtrado gaussiano y remoción de fondo para mejorar el contraste y resaltar las estructuras presentes en la muestra.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las células HeLa constituyen la primera línea celular humana inmortalizada, derivada originalmente en 1951 a partir de una biopsia de carcinoma cervical de la paciente Henrietta Lacks [4]. Debido a su capacidad de proliferación indefinida in vitro y su robustez metabólica, estas células han sido fundamentales en el desarrollo de la virología, la oncología y la óptica biomédica avanzada. En este trabajo, las células HeLa fueron seleccionadas como modelo biológico de estudio para evaluar la capacidad del sistema de microscopía sensible a la polarización en la detección de anisotropías e irregularidades morfológicas en entornos tumorales, operando de manera completamente no invasiva y libre de marcadores cromóforos.

Con el objetivo de caracterizar la dinámica estructural celular a diferentes escalas espaciales, las adquisiciones experimentales de las muestras se realizaron bajo dos condiciones de magnificación óptica: 10x y 40x. La inspección mediante el objetivo de baja potencia (10x) se implementó para obtener una vista panorámica y estadística, facilitando el análisis de las distribuciones estructurales globales, la densidad del cultivo y los patrones de orientación macroscópica de la población celular. Por otro lado, la transición hacia el objetivo de alta potencia (40x) se llevó a cabo para examinar con un alto nivel de detalle las regiones intracelulares. Esta mayor resolución espacial hizo posible la visualización de variaciones locales y microestructuras internas, tales como la distribución del citoesqueleto o la densidad nuclear, permitiendo correlacionar de manera precisa los cambios en los parámetros polarimétricos de Stokes con la organización arquitectónica propia de la célula individual.

Imágenes polarimétricas de células HeLa

En la Figura 4 se presentan los mapas paramétricos de Ángulo de Polarización Lineal (AoLP) y Grado de Polarización Lineal (DoLP) obtenidos para el cultivo de células HeLa. Las adquisiciones realizadas con el objetivo de baja potencia (10x) facilitan una inspección panorámica de la muestra, haciendo posible la identificación de distribuciones estructurales globales y patrones macroscópicos de orientación celular dentro de la población. Por otra parte, mediante el empleo de líneas de acercamiento óptico hacia una región de interés (ROI) evaluada a alta potencia (40x), se logra examinar con un alto nivel de detalle el microentorno individual. Esta transición de escala espacial

resalta de forma nítida las variaciones locales y las microestructuras internas que típicamente resultan difíciles de discriminar o carecen de contraste suficiente bajo técnicas de microscopía convencional basadas únicamente en intensidad de campo claro.

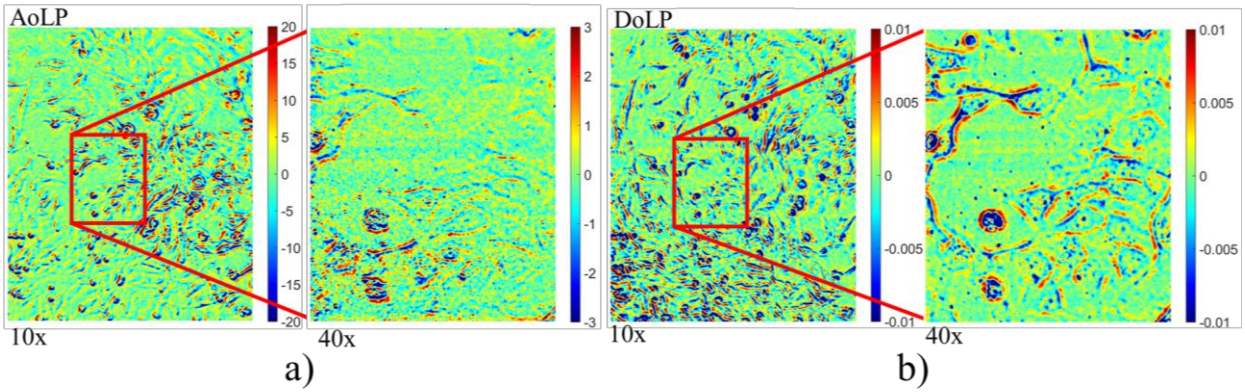


Figura 4. Mapas cuantitativos de AoLP y DoLP en muestras de células HeLa capturados a diferentes aumentos. El sector izquierdo detalla el comportamiento del Ángulo de Polarización Lineal a 10x y su sección magnificada a 40x (recuadro rojo). El sector derecho exhibe las distribuciones homólogas del Grado de Polarización Lineal.

CONCLUSIONES

Se implementó exitosamente un sistema de microscopía sensible a la polarización basado en un microscopio invertido Olympus IX50 acoplado a una cámara de polarización pixelada para el monitoreo celular en tiempo real. La metodología propuesta permitió adquirir y procesar imágenes polarimétricas mediante parámetros de Stokes, obteniendo el Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP). Las imágenes polarimétricas obtenidas mostraron sensibilidad a variaciones anisotrópicas y estructurales presentes en células HeLa, proporcionando contraste complementario respecto a las imágenes convencionales de campo claro. Asimismo, la metodología implementada representa una alternativa no invasiva y libre de marcadores para el estudio de la dinámica estructural celular en tiempo real. Los resultados obtenidos destacan el potencial de las técnicas de imágenes sensibles a la polarización en aplicaciones de óptica biomédica, biomecánica celular y microscopía avanzada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Determination of Stokes vector from a single image acquisition. Annalen der Physik, 536(6), 2300471.
2. Olympus Corporation, “IX50/IX70 Inverted Microscope Instruction Manual,” [Online]. Available: https://www.ucc.ie/en/media/academic/anatomy/imagingcentre/icdocuments/Olympus-IX50-IX70-Inverted-Microscope-ManualBSIMODEL.pdf
3. Thorlabs, “Polarization Camera with 5.0 MP Monochrome CMOS Sensor,” [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/polarization-camera-with-5.0-mp-monochrome-cmos-sensor?tabName=Specs
4. Harvard University, “Vessels for Collective Progress: The Use of HeLa Cells in COVID-19 Research,” Sep. 4, 2020. [Online].

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE UN SIMULADOR DE PULSOS CARDÍACOS PARA ESTUDIO DE SEÑALES FOTOPLETISMOGRÁFICAS (PPG)

Zyania Lavina Bernabé Morales[1A], Óscar de Jesús Hernández Hernández[2], Patricia Padilla Sosa[1B], Lizbeth Angélica Castañeda Escobar[2] , Héctor Hugo Cerecedo Núñez[1C]

[1] Facultad de Física, Universidad Veracruzana, [2] Instituto Tecnológico Superior de Xalapa.
[A] zyaniabernabemorales@gmail.com, [B] ppadilla@uv.mx, [C] hacerecedo@uv.mx

RESUMEN

El presente trabajo describe la validación técnica y caracterización óptica de un arreglo experimental diseñado como simulador de pulsos cardíacos orientado a la exploración del uso de la Fotopletismografía (PPG) en la estimación de rigidez arterial, un reconocido predictor de eventos cardiovasculares mayores. Se propone un modelo experimental constituido por una manguera de látex (2 m) que simula una arteria, acoplada a una bomba hidráulica controlada electrónicamente capaz de generar flujo pulsátil programable. Como fuente óptica se empleó un diodo láser rojo, registrándose la intensidad transmitida mediante sensores fotodetectores distribuidos a lo largo del medio. Los resultados muestran variaciones temporales consistentes con el patrón pulsátil inducido. Se analizaron la atenuación promedio, la reducción de amplitud en función de la distancia, el coeficiente de amortiguamiento y la correlación entre señales, para dar paso a la identificación de la velocidad de onda de pulso (VOP). Los resultados preliminares confirman la sensibilidad del sistema ante variaciones controladas del flujo, validando la viabilidad del montaje como modelo óptico para el estudio de señales tipo PPG y como plataforma experimental para futuras aplicaciones biomédicas.

INTRODUCCIÓN

El tema central de esta etapa de investigación es la Fotopletismografía o PPG, una técnica óptica no invasiva cuyas aplicaciones se encuentran en el sector comercial y médico. La PPG se implementará en el estudio y/o caracterización de un sistema que simula pulsos cardíacos, esto debido a la necesidad de establecer un punto de partida experimental con materiales asequibles para analizar el funcionamiento básico de la PPG e identificar qué parámetros son medibles con dicha técnica. La importancia del estudio e implementación de la PPG radica en la necesidad de desarrollar métodos de monitoreo fisiológico continuo que sean no invasivos, accesibles y aplicables fuera de entornos clínicos tradicionales, de acuerdo con Kim & Baek (2023) ”Recientemente, la creciente demanda de tecnología no invasiva, portátil y rentable, junto con los avances en componentes semiconductores pequeños, ha propiciado la integración de la PPG en diversos dispositivos portátiles de muñeca” así mismo Xie et al. (2021) mencionan desde la perspectiva médica que “la tecnología portátil inteligente no solo ayuda a las personas a adoptar un estilo de vida más saludable, sino que también proporciona un flujo continuo de datos sanitarios para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades”. Finalmente, se espera estudiar la propagación de pulsos de agua controlados a través de una manguera de látex, con el fin de analizar su dinámica y las características de su propagación, como la velocidad y atenuación del pulso en el medio. Con el objetivo de analizar su comportamiento como un modelo simplificado de la propagación de pulsos de presión en el sistema cardiovascular y emplearlo en una segunda etapa de investigación aplicando un prototipo.

TEORÍA

La PPG se basa en la medición de variaciones en la intensidad de la luz asociadas a los cambios volumétricos sanguíneos en los tejidos. Su estructura básica consta de un sensor y una fuente de luz, puede operar en dos modos: reflexión y transmisión, ver figura 1. En el modo de reflexión, la

fuente de luz y el fotodetector se colocan juntos y utilizan longitudes de onda entre 495 y 570 nanómetros (nm), como en smartwatches.

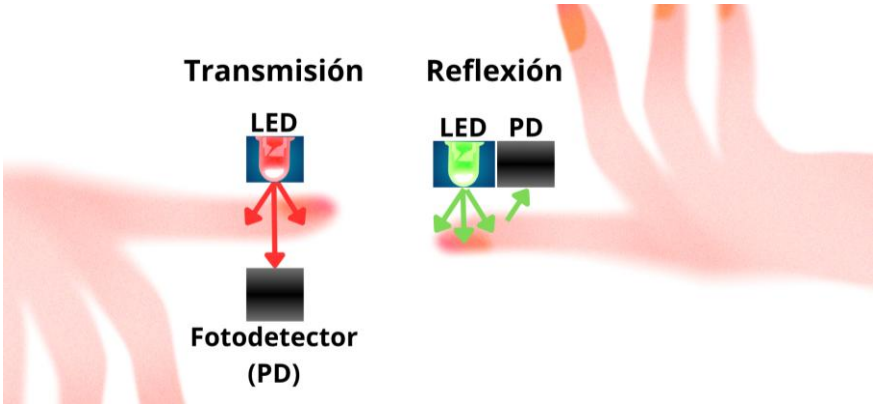


Figura 1. Diagrama creación propia

En el modo de transmisión, ambos se colocan en lados opuestos del tejido y emplean longitudes de onda entre 650 y 1110 nm, permitiendo que la luz lo atraviese, como en oxímetros. Comúnmente en el uso de PPG se implementan filtros que limpian las señales y de ello se pueden obtener gráficas en tiempo real que muestran la forma de las ondas generadas en cada ciclo cardíaco debido a los cambios volumétricos en los vasos. Conocer cómo interacciona la luz con la piel es lo que permite identificar el rango de longitudes de onda a ocupar de acuerdo con el modo seleccionado (transmisión o reflexión), según Han, S.et al. (2019) las longitudes de onda entre los 390 a 600 nanómetros penetran superficialmente hasta la dermis en donde se encuentran los arterioles, mientras que las longitudes entre los 600 a 1110 nanómetros penetran profundamente hasta la hipodermis en donde se encuentran las arterias, ver figura 2. Es por lo anterior que hay rangos de longitudes de onda que se utilizan específicamente para cada modo.

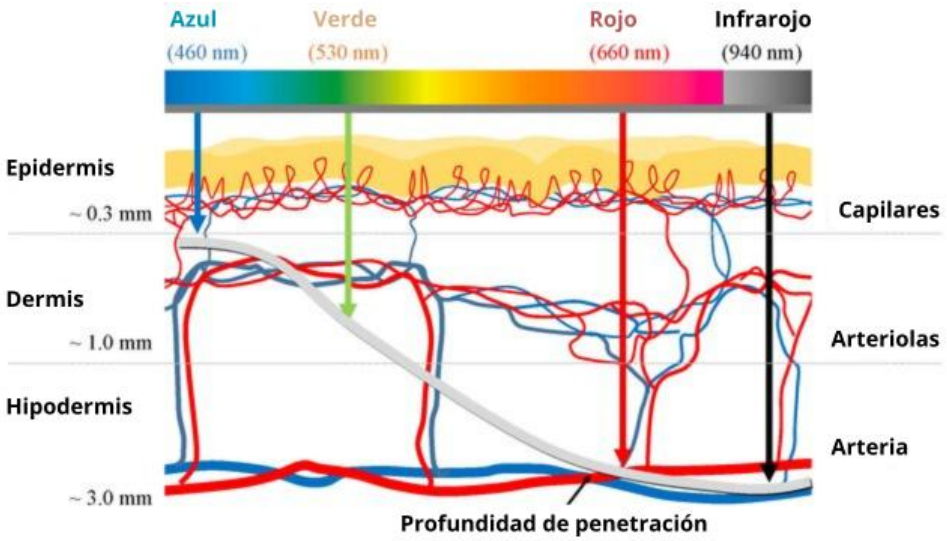


Figura 2. Modificado de Han, S. et al. (2019)

Como sabemos la intensidad de la luz se atenúa a medida que atraviesa la piel, esto es debido a la absorbancia dependiente de la concentración de los cromóforos y de la longitud de trayectoria óptica, de acuerdo con la ley de Beer-Lambert. Tras la detección de la luz, ya sea en modo de transmisión o reflexión, el sensor convierte la señal óptica en una señal eléctrica denominada PPG. Dicha señal se encuentra constituida por una componente cuasi estática (CC), asociada a la absorción basal del tejido, y una componente pulsátil (CA), vinculada a las variaciones volumétricas sanguíneas.

Comúnmente, la componente CA representa alrededor del 10% de la CC, y ambas se relacionan a través del índice de perfusión (Caizzone, Boukhayma & Enz, 2019). A continuación se definen las componentes cuasi-estáticas y pulsátiles.

$$CC = \underline{I} = \frac{1}{N}\sum_{n}^{N} \quad I_n \tag{1}$$

$$CA = I - \underline{I} \tag{2}$$

Donde I es la intensidad registrada por los sensores.

El índice de perfusión IP se utilizó inicialmente como un indicador de la calidad de la señal en sistemas de oximetría de pulso. Actualmente también se emplea en estudios de monitorización hemodinámica no invasiva, ya que su valor puede verse influenciado por diversos factores fisiológicos y fisiopatológicos, entre ellos la perfusión periférica (relación entre el flujo sanguíneo pulsátil y no pulsátil en la región periférica) y la rigidez arterial (pérdida de elasticidad en arterias).

$$IP = \frac{CA}{CC} \tag{3}$$

Lo que se intenta simular es el pulso arterial que puede describirse como una onda de presión que se propaga a través de las arterias debido a la contracción del ventrículo izquierdo del corazón, generando expansiones y contracciones periódicas en los vasos sanguíneos.

La propagación del pulso a través de un sistema como una manguera de látex implica analizar el debilitamiento que sufre. La atenuación de onda es la pérdida de energía al propagarse a través de un medio. Para las señales ópticas el uso del decibelio es frecuente, cuando se trabaja en un contexto de señales transmitidas y de ruido, para lo cual se trabajan potencias ópticas o potencias de modulación, en el caso del presente trabajo se aborda la potencia óptica, pues se realiza una detección directa implementando los sensores de luz, lo cual se traduce en fotocorriente. Según Davis et al. (2006)**,** el decibel dB se definió como la forma logarítmica de la relación de dos cantidades de potencia P_1 y P_2.

$$10log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = NdB \tag{4}$$

Donde N corresponde al número de decibeles. De forma similar, se cuantifica la atenuación At de la siguiente manera:

$$At = 10\ log_{10}\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \tag{5}$$

Con lo anterior se identifica la pérdida de potencia entre dos puntos. Por otra parte, en interacciones como la estudiada, se encuentra presente la ley de Beer Lambert “Esta ley se aplica ampliamente en la óptica biomédica, por ejemplo, para calcular la saturación de oxígeno en tejidos humanos” (Oshina & Spigulis, 2021)

$$I = I_0 e^{-\mu d} \tag{6}$$

Donde $I0$ es la intensidad emitida por la fuente, I la intensidad detectada por el sensor, $\boldsymbol{\mu}$ es el coeficiente de absorción, y la longitud de recorrido de la luz “d” son proporcionales en medios homogéneos. El coeficiente se puede escribir de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{d} log\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{7}$$

En señales PGG la componente basal o CC se asocia a la transmisión óptica promedio del tejido, aunque en este trabajo no se calculó explícitamente el coeficiente de absorción ni absorbancia.

Cabe destacar que para el presente proyecto se propone la evaluación y registro de datos de dos sensores de luz (ver figura 3) colocados en puntos diferentes a determinada distancia entre sí, este arreglo se describe con mayor profundidad en la sección de metodología, sin embargo, resulta importante hacer mención de ello para explicar de forma teórica parte del conjunto de elementos que se evaluarán en la sección de análisis, siendo así, una parte importante del estudio es el coeficiente de correlación de Pearson, que se usa para medir la relación estadística entre dos variables que pueden adoptar cualquier valor dentro de un determinado intervalo; en nuestro caso, esto nos permitirá demostrar el grado de correlación entre los datos registrados por nuestros sensores.

Así mismo se estarán estudiando características como la frecuencia de las señales f, registradas para lo cual se hace una analogía con la frecuencia cardíaca, conociendo:

$$f = \frac{1}{T} \tag{8}$$

Donde f es la frecuencia y T el período, éste último se puede determinar mediante la detección de máximos locales o picos sistólicos en la señal obtenida. Si se tienen picos en puntos $t_1, t_2, \ldots, t_n$; los períodos se calculan como:

$$T_i = t_{i+1} - t_i \tag{9}$$

El período promedio será $T = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \quad T_i$; y se implementará la fórmula 8).

Otra característica que se puede estudiar es el desfase. Sea la evaluación de dos puntos que se hallan a determinada distancia entre sí, las formas de las señales pueden presentar un desplazamiento temporal, para evaluar dicho desfase se implementa la correlación cruzada, c_{fh}:

$$c_{fh}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \qquad f^*(t)h(t+\tau)dt \tag{10}$$

En python, la función de la librería Scipy que se puede ocupar para este caso es *correlate()* la cual opera como:

$$(f \star g)[n] \; = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \qquad f[m] \cdot g[n+m] \tag{11}$$

Para este último caso f, g son las señales de entrada n es el desplazamiento y m el índice. El tiempo de tránsito de pulso PTT matemáticamente representa el tiempo que le toma a un pulso llegar de un punto a otro al interior de una arteria, y se considera una medida indirecta de la presión arterial.

$$PTT_i = t_i(S_2) - t_i(S_1) \tag{12}$$

Donde t_i representa el tiempo y S_2, S_1 son los sensores empleados. El promedio sería:

$$\underline{PTT} = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} \quad PTT_i \tag{13}$$

una vez obteniendo valores para el tiempo de tránsito de pulso y conociendo la distancia L entre sensores se puede obtener la velocidad de onda de pulso VOP mediante la siguiente fórmula:

$$VOP = \frac{L}{PTT} \tag{14}$$

Finalmente una parte fundamental del análisis será la relación señal ruido SNR se refiere a la relación entre la potencia de una señal y la potencia del ruido en el sistema, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$SNR = 10 * log_{10}\left(\frac{P_{señal}}{P_{ruido}}\right) \tag{15}$$

PARTE EXPERIMENTAL

En esta sección se presentarán los materiales empleados en la realización de los experimentos, así como la metodología llevada a cabo.

Materiales

Bomba de agua de pecera, dispositivo electrónico (Relevador), dos mangueras de látex (diámetro:, espesor:), agua y trastes de plástico, base para colocar placa con cinta métrica, prisma (vidrio convencional), bases para el prisma y los sensores, diodo láser rojo (650nm), interfaz PASCO (ScienceWorkshop 750 interface), dos sensores de luz, PASCO (CI-6604), Software DataStudio. Ver figura 3.

Metodología

La metodología a mostrar a continuación se encuentra constituida de dos etapas, en la primera se explicará el montaje del simulador de pulsos y en la segunda se explicará el arreglo implementado para la recolección de datos usando sensores de luz.

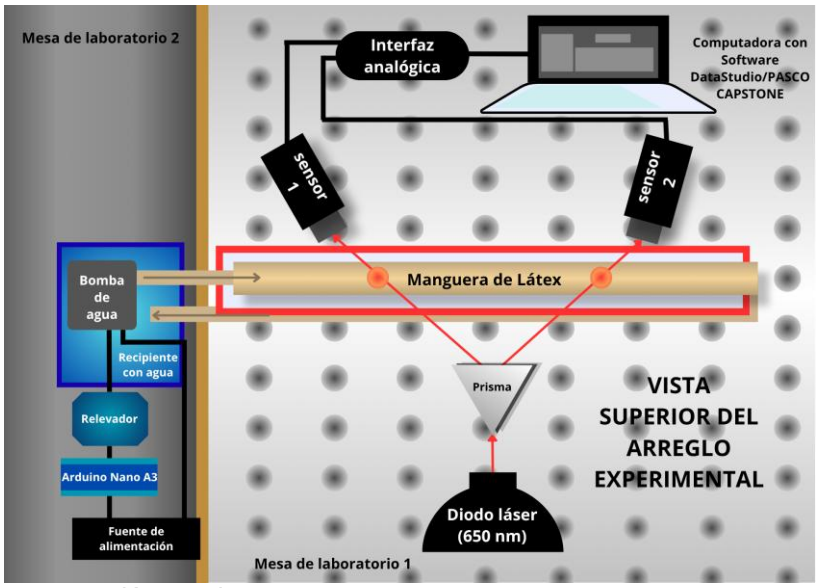


Figura 3. Diagrama creación propia.

Arreglo experimental del simulador de pulsos.

Los materiales utilizados para la construcción del arreglo experimental que simula la propagación de pulsos consisten en mangueras de látex, una bomba de agua y un relevador programable. El sistema se montó sobre una bandeja en la cual se colocó un recipiente con agua. En el fondo de dicho recipiente se posicionó la bomba de agua, la cual fue operada a su capacidad máxima de flujo (230 L/h). Las mangueras de látex se unieron mediante la conexión de sus extremos, reforzando la unión con cinta aislante para evitar fugas.

Uno de los extremos de la manguera resultante se acopló a la boquilla de salida de la bomba, de diámetro aproximado de 8.2 mm. La manguera se dispuso de tal forma que el agua circulante retornara al recipiente, permitiendo la recirculación del fluido. El resto de la manguera se extiende sobre una superficie plana, junto a una cinta métrica colocada en uno de sus bordes para facilitar la medición de distancias. Durante el montaje, se procuró que no existieran obstrucciones en la manguera, con el fin de garantizar un flujo continuo y uniforme. Cabe destacar que este primer sistema se coloca en una mesa distinta al del arreglo óptico con el fin de evitar ruido en las mediciones debido a las vibraciones producidas por la bomba de agua.

Arreglo óptico.

Para la etapa de medición se emplearon dos sensores PASCO, un diodo láser rojo, una interfaz PASCO y una computadora con el software Data Studio instalado. El haz del diodo láser se dividió mediante un prisma, de modo que ambos haces incidieron sobre la manguera de látex, rozando su superficie superior. De esta forma, se implementó un modo PPG de transmisión parcial modulada. Detrás de la manguera se colocaron los dos sensores, alineados de manera que pudieran captar parte de los haces transmitidos tras interactuar con el material. La adquisición de datos se realizó mediante el software DataStudio, el cual registró las señales provenientes de los sensores a través de la interfaz PASCO.

RESULTADOS

Se recolectaron datos de intensidad de luz de los sensores correspondientes, a una frecuencia de muestreo de 100 hz durante aproximadamente 200 a 300 segundos. Lo que se busca realizar con estos datos es determinar la eficacia del arreglo experimental como herramienta en futuras pruebas, para ello se estará analizando la correlación entre los datos obtenidos primero asegurándonos de que los métodos seleccionados son válidos, esto mediante el coeficiente de Pearson y el método de Bland-Altman. Posteriormente se analizarán las frecuencias registradas así como el desfase, los índices de perfusión, atenuación y relación señal ruido (SNR).

Tabla 1. Datos recolectados de las características de las señales registradas por cada sensor.

Serie	DC1	DC2	AC1	AC2	At ac (dB opt)	At rel (dB opt)	Frecuencia detectada (Hz)
1	(52.25 ± 0.15)	(68.17 ± 0.88)	(0.0907 ± 0.0004)	(0.571 ± 0.003)	(15.98 ± 0.05)	(13.68 ± 0.13)	0.15
2	(59.23 ± 0.06)	(63.01 ± 0.34)	(0.0791 ± 0.0003)	(0.1822 ± 0.0008)	(7.25 ± 0.05)	(6.71 ± 0.07)	1.25
3	(59.41 ± 0.06)	(62.09 ± 0.26)	(0.0768 ± 0.0003)	(0.1736 ± 0.0008)	(7.08 ± 0.05)	(6.69 ± 0.07)	1.24
4	(29.17 ± 0.21)	(28.51 ± 0.72)	(0.305 ± 0.001)	(0.359 ± 0.002)	(1.40 ± 0.05)	(1.6 ± 0.2)	1.25

La Tabla 1 muestra datos recolectados de las características de las señales registradas por cada sensor, siendo las componentes pulsátiles y basales aquellas que las conforman, se observa que en cada serie la componente basal era mayor que la componente pulsátil. Así mismo se muestran los resultados de atenuación que describe la reducción de amplitud que experimenta la señal al propagarse entre dos puntos de medición, se logra ver que el valor de atenuación disminuye con cada serie, siendo la serie 1 la que registra valores más altos y la serie 4 la que registra valores más pequeños, en general se considera que una mayor atenuación implica que el pulso pierde intensidad conforme avanza por el sistema. La frecuencia detectada nos indica si la frecuencia observada coincide con la correspondiente a la operación de la bomba hidráulica, que operaba a 1.25 hz aproximadamente, en la tabla 2 se ve que los valores registrados de cada serie se acercan o son ese valor.

Tabla 2. Datos de desfase que corresponde al retardo temporal entre las señales registradas por los dos sensores.

Serie	Desfase (s)	PTT promedio (s)	VOP (m/s) (d=0.2 m)	Pearson	IP Sensor 1 (%)	IP Sensor 2 (%)	SNR S1 (dB opt)	SNR S2 (dB opt)
1	-0.64	(-0.04 ± 0.02)	—	0.51	0.17	0.84	-3.79	-1.10
2	-0.27	(0.030 ± 0.001)	6.58	0.50	0.13	0.29	12.67	12.89
3	-0.27	(0.032 ± 0.001)	6.19	0.55	0.13	0.28	12.29	13.06
4	-0.02	(0.0427 ± 0.0005)	4.68	0.98	1.05	1.25	13.82	13.39

El PTT promedio indica el tiempo de tránsito medio del pulso al recorrer una determinada distancia. La velocidad de onda de pulso que se calculó utilizando el PTT y la distancia a la que fueron colocados los sensores entre sí que comprende 20 cm, en la primera serie no fue posible obtener un valor congruente mientras que en el resto de series sí lo fue. El coeficiente de pearson se calculó para observar la correlación existente entre los dos sensores por cada serie, en general se prefieren valores arriba de 0.5 para evaluar la correlación, la serie que mejor índice registró en nuestro caso fue la número 4. Los índices de perfusión nos indican qué tan dominante es la componente pulsátil respecto al nivel promedio de luz detectada, en general consideramos un margen aceptable a partir de 0.5%. Por otra parte se encuentra la relación señal ruido que mide el grado de distinción de la señal pulsátil respecto al ruido presente en las mediciones, valores altos de SNR representan señales limpias y confiables, consideramos un margen aceptable a partir de 10 dB.

En la figura 4 se observan las señales obtenidas en las distintas etapas de análisis por cada sensor. Las ondas correspondientes a las líneas azules representan los datos en crudo de los sensores, las ondas de color verde y naranja corresponden a la señal filtrada, la correspondiente a la línea de color verde es la componente pulsátil para lo cual se usó una frecuencia de corte entre 0.8 y 3 hz, la correspondiente al color naranja es la componente basal.

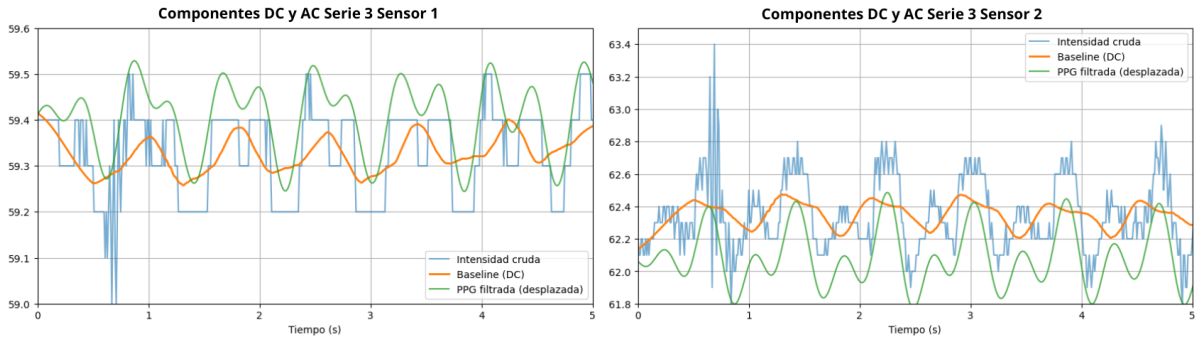


Figura 4. Señales de datos iniciales tomados por los sensores 1 y 2.

La figura 5 muestra las componentes pulsátiles de ambos sensores (1 y 2) superpuestas, con el fin de observar el desfase existente entre ambas ondas. Así mismo se muestra en la última gráfica una versión de la primera donde se desplaza la señal del segundo sensor para observar la diferencia de amplitud existente.

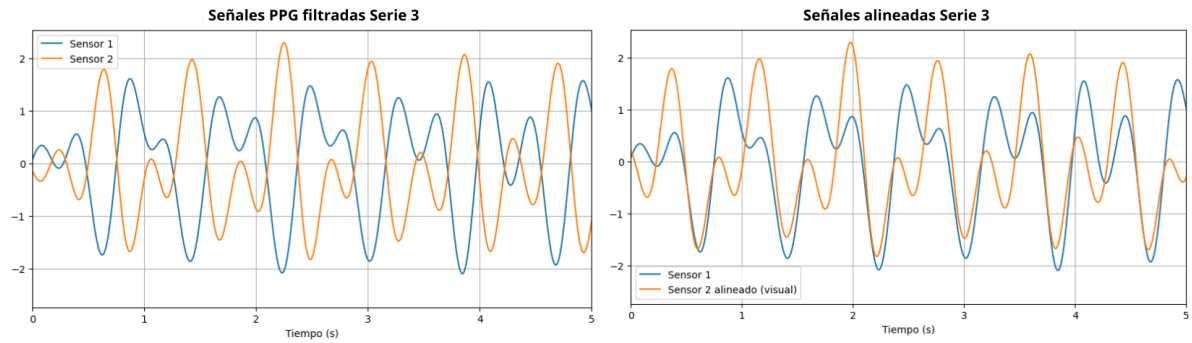


Figura 5. Señales de datos procesados.

Resumen de resultados obtenidos

En general se observó una diferencia entre los resultados de cada serie, siendo la primera aquella en donde mayor ruido se detectaba, y la última serie aquella en la que se obtuvieron mejores resultados. Debido a esto y contrastando con la metodología empleada se puede observar que el arreglo implementado es altamente sensible al ruido, sin embargo, la obtención de resultados como los expuestos nos permitirá planear soluciones y mejoras a este experimento.

CONCLUSIONES

Este experimento ha servido de aprendizaje en la metodología para el análisis de la Fotopletismografía, al identificar los procesos que se siguen para implementar este tipo de técnicas y así sentar las bases de futuros proyectos de investigación relacionados al tema.

Como se ha podido observar el arreglo experimental propuesto, tanto en la parte óptica como en la parte del simulador de pulsos cardíacos funcionan de modo que se logró la obtención de resultados sobre la detección de pulsos de agua a través del sistema. El arreglo óptico en general fue apto para realización de mediciones indirectas de las variaciones volumétricas en la manguera debido al flujo pulsátil de agua que viajaba a través de ella, sin embargo, cabe destacar que por su configuración resultó altamente sensible a ruido debido a factores externos, siendo que las componentes basales en las series registradas mostraron valores altos, así mismo se observan oportunidades de mejora en ese ámbito, como una mejor colocación del material o agregar elementos que favorezcan la eliminación de ruido en las mediciones.

Por otra parte el sistema que involucra la manguera y la bomba de agua resultaron eficaces para reproducir de forma simplificada la dinámica pulsátil de un sistema cardiovascular, sin embargo, existe un factor que puede mejorar o modificarse para facilitar el registro de datos y es el material o estructura de la manguera que sirve de análogo a las arterias, esto debido al grosor implementado. Finalmente se considera que los resultados fueron congruentes y se da validación al sistema empleado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kim, K. B., & Baek, H. J. Photoplethysmography in wearable devices: current trends and future directions. Electronics, 12(13), 2923, 2023. DOI: 10.3390/electronics12132923
2. Xie, Y., Lu, L., Gao, F., He, S.-J., Zhao, H.-J., Fang, Y., Yang, J.-M., An, Y., Ye, Z.-W., & Dong, Z. (2021). *Integration of artificial intelligence, blockchain, and wearable technology for chronic disease management: A new paradigm in smart healthcare*. Journal of Medical Systems, 41(6), 1123–1133. https://doi.org/10.1007/s11596-021-2485-0

3. S. Han, D. Roh, J. Park, and H. Shin, “Design of Multi-Wavelength Optical Sensor Module for Depth-Dependent Photoplethysmography,” Sensors, vol. 19, no. 24, p. 5441, 2019. doi: 10.3390/s19245441.
4. Oshina, I., & Spigulis, J. (2021). *Beer–Lambert law for optical tissue diagnostics: Current state of the art and the main limitations*. Journal of Biomedical Optics, 26(10), 100901. https://doi.org/10.1117/1.JBO.26.10.100901
5. A. Caizzone, A. Boukhayma, and C. Enz, “AC/DC ratio enhancement in photoplethysmography using a pinned photodiode,” IEEE, 2019.

OPTIMIZACIÓN METODOLÓGICA DE LA LST Y UHI CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES

Kevin Yair Garcia Salazar, Pedro Arguijo, José Salas Martínez, Roberto Ángel Melendez Armenta, David Lara Alabazares

Instituto Tecnológico Superior de Misantla
kevinyairgarciasalazar42@gmail.com

RESUMEN

Las Islas de Calor Urbanas (UHI, por sus siglas en inglés) representan uno de los fenómenos ambientales más relevantes en ciudades en crecimiento, debido a su impacto en la temperatura superficial; aunque sus efectos se perciben, no son visibles directamente. En la región Nautla, que comprende 11 municipios, incluyendo Misantla, se identificó la ausencia de una metodología automatizada para el monitoreo térmico multitemporal, lo que limita la adquisición de grandes conjuntos de datos para evaluar fenómenos meteorológicos. Los programas especializados actualmente disponibles requieren altos recursos en tiempo, dispositivos con mayor capacidad y costos de licencia altos. Para superar estas limitaciones presentadas, el proyecto desarrolla un flujo de trabajo integral y automatizado en Python para procesar imágenes multiespectrales Landsat 8-9 (OLI/TIRS) correspondientes al período 2013–2024. El sistema permite recortes geoespaciales mediante shapefiles, calcular índices espectrales como el NDVI, recuperar la temperatura superficial terrestre (LST) mediante la ecuación de Planck, y estima la intensidad térmica urbano–rural asociada a la UHI. Asimismo, se diseñó un script de validación que compara los productos generados con resultados previos obtenidos en ArcGIS, garantizando precisión y reproducibilidad. Dicho script implementa una comparación detallada de la imagen real y la estimada por la automatización, en el cual se evalúan diversos factores tales como conteo de píxeles válidos, los cuales muestran 8582 valores reales y 8577 valores estimados de la LST. Medidas de tendencias central donde la LST real presenta una media de 20.68 °C y una mediana de 21.30 °C, mientras que la estimada muestra ligeramente valores superiores, con una media de 20.74 °C y una mediana de 21.36 °C. Estas diferencias al ser mínimas sugieren que el modelo de estimación reproduce adecuadamente el comportamiento térmico, con un margen muy bajo de diferencia justificando que el producto puede ser utilizado para evaluar comportamientos térmicos. Tomando en cuenta los indicadores de error global, como lo es el Error Cuadrático Medio (ECM = 0.00326) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE = 0.057° C), evidencian un alto nivel de precisión en la estimación de la LST, lo que de igual manera valida el uso del método empleado para la generación de los productos de una manera automática y fácil de implementar para otros estudios.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades ha transformado de manera importante la superficie terrestre, ya que muchas áreas naturales han sido reemplazadas por calles, edificios y otros elementos urbanos. Estos cambios modifican la forma en que la superficie absorbe y libera energía, provocando diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y sus alrededores. A este fenómeno se le conoce como Isla de Calor Urbana (Urban Heat Island, UHI).

Actualmente, las imágenes satelitales son una de las herramientas más utilizadas para estudiar este fenómeno, pues permiten observar cómo se distribuye la temperatura en el territorio y analizar los efectos que tiene la expansión urbana sobre el ambiente. En este tipo de estudios, la Temperatura Superficial Terrestre (Land Surface Temperature, LST) es uno de los indicadores más empleados para describir el comportamiento térmico de la superficie.

A pesar de que existen métodos bien establecidos para obtener la LST a partir de imágenes Landsat, gran parte del procesamiento todavía se realiza de manera manual utilizando software especializado.

Cuando se trabaja con grandes cantidades de imágenes, este proceso puede volverse lento y repetitivo, además de incrementar la posibilidad de errores durante el análisis.

Con el fin de simplificar este procedimiento, en este trabajo se desarrolló una metodología automatizada para estimar la UHI mediante imágenes Landsat 8 y herramientas de código abierto en Python. La metodología se aplicó en el municipio de Misantla, Veracruz, permitiendo automatizar todo el flujo de procesamiento y generar información térmica comparable para distintas fechas del periodo 2013–2024.

TEORÍA

La teledetección permite obtener información de la superficie terrestre mediante sensores remotos capaces de registrar la energía reflejada y emitida por distintos tipos de cobertura. Dentro de este estudio se utilizaron imágenes Landsat 8 debido a su disponibilidad gratuita, resolución espacial adecuada y capacidad para registrar información óptica y térmica [1, 2, 3].

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más utilizados para evaluar la presencia y densidad de vegetación. Este índice se calcula a partir de las bandas roja (B4) e infrarrojo cercano (B5), permitiendo identificar áreas con diferente cobertura vegetal [8].
La Temperatura Superficial Terrestre (LST) se obtiene mediante la transformación de los valores digitales registrados por la banda térmica B10 a radiancia espectral, posteriormente a temperatura de brillo y finalmente a temperatura superficial corregida por emisividad [4, 5, 10].

La emisividad superficial representa la capacidad de una superficie para emitir radiación térmica y constituye una variable indispensable para estimar adecuadamente la temperatura superficial. En este trabajo se calculó a partir de la fracción de vegetación derivada del NDVI [6].

Finalmente, la intensidad de la Isla de Calor Urbana se estimó mediante una normalización estadística basada en z-score aplicada a los valores de LST, permitiendo identificar zonas relativamente más cálidas o más frías respecto al comportamiento térmico general de cada escena analizada [9, 11].

PARTE EXPERIMENTAL

La metodología propuesta mostrada en la figura 1 fue desarrollada para optimizar la obtención de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) y la Isla de Calor Urbana (UHI) a partir de imágenes Landsat 8 correspondientes al municipio de Misantla, completamente en Python utilizando bibliotecas especializadas para el manejo de datos geoespaciales y ráster de Veracruz. El flujo de procesamiento fue implementado

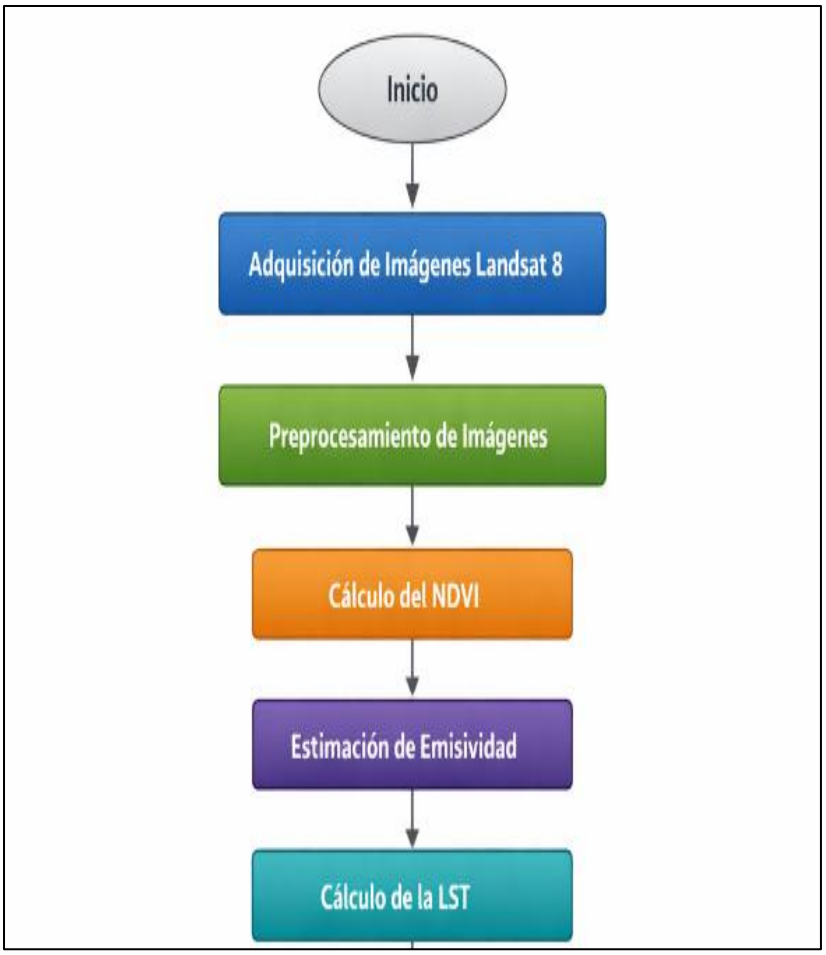


Figura 1 Diagrama de flujo del proceso metodológico automatizado para la obtención de NDVI, LST y UHI

Inicialmente se recopilaron imágenes Landsat 8 correspondientes al periodo 2013–2024 desde la plataforma USGS Earth Explorer. Posteriormente, las escenas fueron organizadas mediante una estructura jerárquica de carpetas diseñada para automatizar la localización de archivos de entrada y salida.

Posteriormente, el sistema identifica automáticamente las escenas Landsat y localiza los archivos de metadatos MTL. A partir de estos archivos se extraen las constantes radiométricas necesarias para convertir los valores digitales a radiancia espectral y temperatura de brillo.

Una vez identificadas las escenas Landsat, el sistema localiza automáticamente los archivos de metadatos MTL y extrae las constantes radiométricas necesarias para la conversión de los valores digitales a radiancia espectral. La radiancia TOA se obtuvo mediante:

$$L_\lambda = ML * DN + AL \quad (1)$$

Donde:

- L_λ es la radiancia espectral ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)
- DN es el valor digital del píxel
- ML es el factor multiplicativo de radiancia
- AL es el factor aditivo de radiancia

Posteriormente, la radiancia espectral fue transformada a temperatura de brillo utilizando las constantes térmicas K1 y K2 proporcionadas por Landsat 8:

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}+1\right)} \quad (2)$$

Donde:

- BT es la temperatura de brillo en Kelvin
- Lλ es la radiancia espectral,
- K1/K2 son constantes de calibración térmica

Las ecuaciones (1) y (2) son estándares oficiales para Landsat 8, descritas en la bibliografía técnica del sensor.

El recorte espacial de las imágenes fue realizado mediante un shapefile municipal empleando las bibliotecas Rasterio y GeoPandas. Este procedimiento permitió reducir el volumen de información procesada y garantizar que todos los productos generados correspondieran exclusivamente al área de estudio.

Posteriormente se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) utilizando las bandas rojas (B4) e infrarrojo cercano (B5):

$$NDVI = \frac{B5-B4}{B5+B4} \quad (3)$$

donde:

- B4 corresponde a la banda roja (RED) del sensor OLI.
- B5 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR).

La emisividad superficial fue estimada mediante el método NDVI–Umbral, el cual es ampliamente utilizado en investigaciones de teledetección térmica para la corrección de la temperatura superficial terrestre [6]. Este enfoque se basa en la relación entre la cobertura vegetal y el comportamiento radiactivo de la superficie.

De manera general, el método considera que:

- Valores bajos de NDVI corresponden a superficies urbanas o desnudas, asociadas a menores valores de emisividad.
- Valores altos de NDVI representan zonas con mayor cobertura vegetal, caracterizadas por emisividades más elevadas.

Este paso es crucial, ya que la emisividad controla la cantidad de radiación térmica emitida por la superficie y permite corregir la temperatura de brillo para obtener una estimación más precisa de la temperatura superficial terrestre.

La Temperatura Superficial Terrestre (LST) fue obtenida mediante la corrección de la temperatura de brillo utilizando la emisividad calculada previamente:

$$LST = \frac{BT}{1+\left(\frac{\lambda * BT}{P}\right)\ln(\varepsilon)} \quad (4)$$

Donde:

- LST: Temperatura Superficial Terrestre (K).
- BT: Temperatura de brillo obtenida a partir de la banda térmica (K).
- λ: Longitud de onda efectiva de la banda térmica.
- ε: Emisividad superficial estimada mediante el método NDVI–Umbral.
- P: Constante radiométrica definida como:

$$P = \frac{h*c}{k} = \frac{1.438\times10^{-2}}{\mathrm{k}} \quad (5)$$

Donde:

- h es la constante de Planck
- c la velocidad de la luz
- k la constante de Boltzmann

Esta formulación ampliamente validada en aplicaciones con imágenes Landsat para la estimación de la temperatura superficial terrestre, y ha sido utilizada de forma recurrente en estudios de Isla de Calor Urbana en diferentes contextos urbanos [4, 5, 10].
Finalmente, la intensidad de la Isla de Calor Urbana fue estimada mediante una normalización estadística basada en z-score:

$$UHI = LST_{urbana} - LST_{rural_ref} \quad (6)$$

Donde:

- UHI es la intensidad de la Isla de Calor Urbana superficial (°C);
- LST_{urbana} corresponde a la temperatura superficial terrestre de las áreas urbanas (°C);
- LST_{rural_ref} representa la temperatura superficial terrestre de referencia asociada a condiciones rurales, obtenida a partir de zonas con alto NDVI y/o percentiles fríos de la distribución de LST (p05 o p10).

Esta formulación permite cuantificar la diferencia térmica entre zonas urbanas y rurales, y es ampliamente utilizada en estudios de clima urbano basados en datos satelitales de temperatura superficial terrestre [9, 11].

La implementación completa fue desarrollada mediante los módulos detalles.py, UHIObtencionMTL.py y colorlst.py, responsables de la exploración automática de directorios, lectura de metadatos, procesamiento térmico y generación automática de productos georreferenciados en formato TIFF y figuras PNG a 300 dpi. La automatización permitió eliminar tareas repetitivas, reducir la intervención manual y asegurar la reproducibilidad del flujo de trabajo para todas las escenas procesadas.

RESULTADOS

La metodología desarrollada permitió automatizar completamente el procesamiento de imágenes Landsat correspondientes al periodo 2013–2024. El sistema fue capaz de generar automáticamente productos NDVI, radiancia, temperatura de brillo, emisividad, LST y UHI sin intervención manual durante el procesamiento.

Los análisis multitemporales realizados evidenciaron diferencias térmicas asociadas a las condiciones estacionales y a la distribución espacial de la cobertura vegetal. Las zonas urbanizadas presentaron temperaturas superficiales superiores a las áreas con mayor presencia de vegetación, confirmando la relación inversa entre cobertura vegetal y temperatura superficial como se muestra en la figura 2.

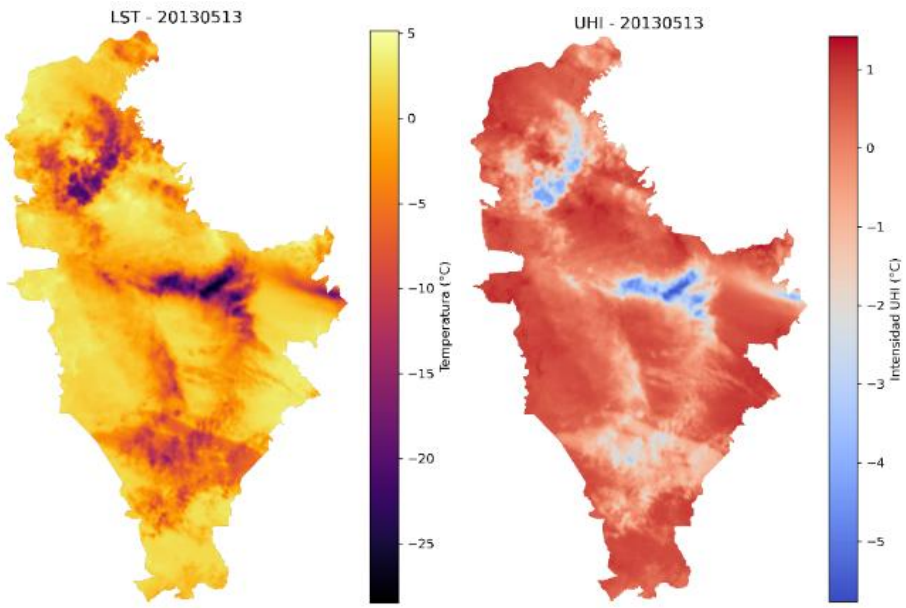


Figura 2. Comparación espacial entre la (LST) y la (UHI) para la fecha 2015-12-29.

Para validar la metodología desarrollada, se realizó una comparación directa entre los productos generados mediante Python y aquellos obtenidos utilizando ArcGIS. Ambas capas fueron comparadas bajo las mismas condiciones de resolución espacial, extensión geográfica y sistema de referencia.

Los resultados obtenidos mostraron una elevada concordancia entre ambos enfoques. La temperatura superficial real presentó una media de 20.68 °C, mientras que la temperatura estimada mediante la metodología automatizada registró una media de 20.74 °C. La diferencia media observada fue de −0.056 °C.

Adicionalmente, se obtuvo un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.00326 y una Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) de 0.057 °C, evidenciando un alto nivel de precisión en la estimación de la temperatura superficial terrestre.

Tabla 1. Muestra general de resultados obtenidos.

bandas	imagen	pixeles	minimo	maximo	media	mediana	desv_est	p05	moda
1	real	8582	12.13563	26.0067	20.67961	21.30136	2.797248	15.79381	22.7963
1	estimada	8577	12.17019	26.08239	20.73634	21.35918	2.804168	15.83811	22.8627
1	diferencia	5	-0.07569	-0.03517	-0.05654	-0.05619	0.007961	-0.06926	-0.0515
Metrica	Valor								
ECM	0.00326								
RMSE	0.057093								

Asimismo, la automatización permitió reducir en más del 80 % el tiempo requerido para procesar múltiples escenas Landsat en comparación con el flujo tradicional implementado manualmente en ArcGIS.

CONCLUSIONES

La metodología automatizada desarrollada permitió obtener de forma confiable la Temperatura Superficial Terrestre (LST) y la Isla de Calor Urbana (UHI) en el municipio de Misantla, Veracruz, utilizando imágenes Landsat 8 y herramientas de código abierto basadas en Python.

La integración de la lectura automática de metadatos, el recorte espacial, el cálculo de NDVI, la estimación de emisividad y la obtención de LST dentro de un único flujo de trabajo permitió reducir significativamente la intervención manual requerida en procedimientos tradicionales.

La validación realizada mediante comparación con ArcGIS demostró una alta compatibilidad entre ambos enfoques, obteniéndose un RMSE de 0.057 °C y diferencias mínimas entre los productos generados. Estos resultados confirman la confiabilidad de la metodología propuesta para aplicaciones de monitoreo térmico urbano.

Además, la automatización permitió reducir los tiempos de procesamiento en más del 80 %, facilitando el análisis de grandes volúmenes de información satelital y mejorando la reproducibilidad de los resultados.

La metodología propuesta constituye una herramienta escalable y adaptable para futuros estudios relacionados con monitoreo térmico urbano, análisis multitemporal y evaluación de cambios ambientales mediante sensores satelitales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] U.S. Geological Survey, *Landsat 8–9 Data Users Handbook*, Version 5.0, Sioux Falls, SD, USA, 2021.
[2] T. M. Lillesand, R. W. Kiefer y J. W. Chipman, *Remote Sensing and Image Interpretation*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
[3] J. R. Jensen, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 4th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2016.
[4] Z.-L. Li et al., “Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 131, pp. 14–37, 2013.
[5] J. C. Jiménez-Muñoz y J. A. Sobrino, “A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. D22, 2003.
[6] J. Cristóbal et al., “Land surface emissivity retrieval from Landsat TM/ETM+ data using a temperature-independent spectral index,” *Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, 2018.
[7] M. Ermida et al., “Google Earth Engine open-source tool for land surface temperature estimation from Landsat satellites,” *Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, 2020.
[8] R. J. Tucker, “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, 1979.
[9] T. R. Oke, “City size and the urban heat island,” *Atmospheric Environment*, vol. 7, pp. 769–779, 1973.
[10] J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz y L. Paolini, “Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, no. 4, pp. 434–440, 2004.
[11] J. A. Voogt y T. R. Oke, “Thermal remote sensing of urban climates,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384, 2003.
[12] Z. Weng, D. Lu y J. Schubring, “Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, no. 4, pp. 467–483, 2004.

MEDICIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL EFECTIVA DE SISTEMAS ÓPTICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE GAUSS

Tomás Serrano Ramírez, Carlos Mares Castro, Martín Montiel Rodríguez, Bernardino Barrientos García

Centro de Investigaciones en Óptica, A. C.
bb@cio.mx

RESUMEN

Presentamos un método simple para la medición de la distancia focal efectiva de sistemas ópticos basado en el método de Gauss. Usando una regleta electrónica, se miden dos distancias conjugadas para una misma distancia entre objeto e imagen —la separación entre los conjugados debe estar en el orden de unos pocos cm—. Esto se repite para dos diferentes distancias objeto. Con ello, se calculan los siguientes parámetros del sistema: distancia focal efectiva y posición de los planos principales. Una variable derivada es la amplificación transversal, la cual permite validar el resultado. Para probar el método, se utilizó una lente telefoto tipo zoom, funcionando a diferentes distancias focales conocidas. De acuerdo a las mediciones de la distancia focal efectiva, se obtuvo una precisión de 0.5%.

INTRODUCCIÓN

El desempeño global de una lente o de un sistema de lentes es influido por los valores de su apertura numérica y de su distancia focal efectiva. Cuando a las lentes se les integra en instrumentos ópticos, esos valores deben ser especificados con la precisión que garantice adecuados niveles de seguridad y eficiencia.

Existen diversos métodos para medir la distancia focal efectiva de lentes gruesas o sistemas ópticos, entre ellos podemos mencionar los basados en óptica geométrica, como lo es el que usa un banco nodal [1-4], donde se requiere encontrar los puntos nodales posterior y anterior, los cuales coinciden con los puntos principales del sistema cuando el sistema está rodeado por aire. Otro método de amplio uso es el del colimador focal o método y'/tanθ [2-4], donde un objeto de tamaño angular conocido se coloca en el punto focal anterior de una lente colimadora. La luz del objeto llega a una lente de prueba, donde se mide la altura de la imagen, la cual se encuentra sobre su plano focal. Dos métodos basados en la posición de puntos conjugados son el de Bessel [5] o Gauss [6] y el de Abbe [7-9]. En el primero, se emplean, para una misma distancia objeto imagen, dos pares de conjugados, y se mide auxiliarmente la distancia de desplazamiento del objeto. Para el método de Abbe, se miden las amplificaciones transversales para el par de posiciones conjugadas.

Existen métodos basados en principios de óptica física. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes: Mediante interferometría de Talbot [10, 11], deflectometría de moiré [12, 13], detector de Shack-Hartmann [14, 15] e interferometría de Fizeau [16, 17].

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de los métodos de Gauss y Abbe, y una mezcla de ellos. Este análisis se presenta para cuando un sistema de imagen se encuentra rodeado por dos medios diferentes, lo cual equivale a extender dichos métodos. Esto último cobra importancia cuando se requiere la caracterización de sistemas ópticos in condiciones parecidas a las in-vitro, como es el caso de la prueba de lentes oftálmicas [18-19]; por ejemplo, para implantes de lentes intraoculares es importante evaluar el grosor y la posición de los planos principales para reducir el error en potencia óptica [20].

TEORÍA

Un sistema formador de imagen o una lente gruesa se puede representar como en la figura 1. En este caso, las flechas grandes representan a un objeto y su imagen, respectivamente; FPP y BPP son la posición de los planos principales anterior y posterior del sistema óptico (representado por un rectángulo). Las distancias objeto e imagen se representan con $\mathbf{o}$ e $\mathbf{i}$.

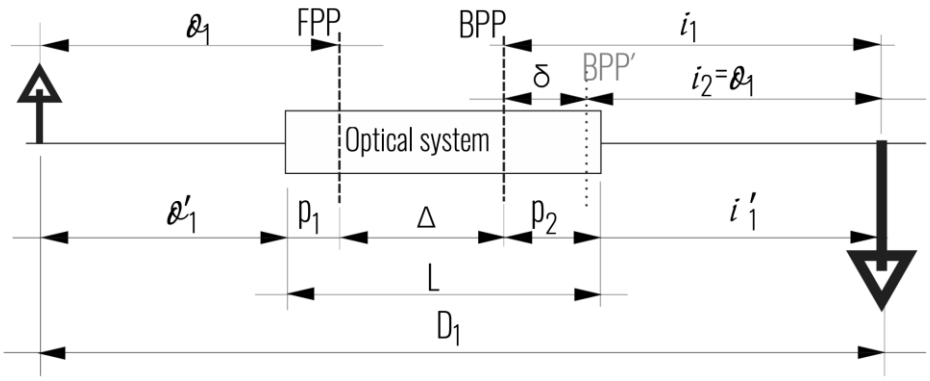


Fig. 1. Esquema de un sistema óptico formador de imagen.

La formación de imagen se expresa por la ecuación de Gauss,

$$\frac{n_1}{\mathbf{o}'+p_1}+\frac{n_3}{\mathbf{i}'+p_2}=\frac{1}{f}=\frac{n_1}{\mathbf{o}}+\frac{n_3}{\mathbf{i}} \qquad (1)$$

donde f es la distancia focal efectiva, n_1 y n_3 son los índices de refracción de los medios que rodean al sistema óptico.

Además,

$$D_1=\mathbf{o}_1+\mathbf{i}_1+\Delta. \qquad (2)$$

Existen dos posiciones conjugadas que cumplen con (2). La distancia entre esas posiciones es $\boldsymbol{\delta}=\mathbf{o}_1-\mathbf{o}_2$.

Combinando (1) y (2), se pueden encontrar las relaciones que se incluyen en la Tabla 1. En las columnas 1 y 2 se presentan las expresiones para el cálculo de la distancia focal efectiva. La tercera columna incluye una breve descripción del procedimiento a seguir para implementar cada método. Los 3 primeros métodos corresponden al caso en el cual el sistema óptico está rodeado de materiales diferentes, $n_1 \neq n_3$. Los restantes renglones contienen a las expresiones correspondientes para cuando la lente se encuentra inmersa en un solo medio, $n_1 = n_3$. Esta última modalidad es la que se reporta en la sección experimental, donde se observa denominación de cada método, como Método 1 (use el caso de amplificación transversal unitaria en combinación con otro par de puntos conjugados, el cual requiere desplazamiento del objeto), Método 2 (use 2 pares de posiciones conjugadas, donde ambos requieren desplazamiento del objeto) y Método 3 (use un par de puntos conjugados, con su desplazamiento de objeto, en combinación con la medición de amplificación transversal).

Tabla 1. Métodos para encontrar la distancia focal efectiva para una lente gruesa o sistema formador de imágenes.

	Longitud focal, f **Distancia entre planos principales Δ, desplazamiento $\delta = o_1 - o_2$**		Implementación del método
$n_1 \neq n_3$	$-\frac{1}{m_2}+\frac{1}{m_1}=\frac{-\delta}{fn_1}$, $\Delta=D_2+\frac{(m_1n_3-n_1)(m_1-1)}{m_1}f$,	$o_1=\frac{n_1m_1-n_1}{m_1}f$, $o_2=\frac{n_1m_2-n_1}{m_2}f$,	Método de Abbe **(1) Para un par de puntos conjugados, mida m_1.** **(2) Desplace el objeto δ, con D_2 fija. Mida δ.** **(3) Mida m_2.**
	$f=\frac{D_1-\Delta}{2(n_1+n_3)}$, $f=\frac{(D_2-\Delta)^2-\delta^2}{(D_2-\Delta)(n_1+n_3)\mp\sqrt{4(D_2-\Delta)^2n_1n_3+(n_1-n_3)^2\delta^2}}$,	**Resuelva para Δ, y luego para f**	Método de Gauss **(1) Mida la distancia objeto-imagen D_1, con $m_1=-1$;** **(2) Escoja otro par de puntos conjugados y mida D_2.** **(3) Desplace el objeto δ, con D_2 fija. Mida δ.**
	$f=\frac{D_1-\Delta}{2(n_1+n_3)}$, $\Delta=D_2+\frac{(m_1n_3-n_1)(m_1-1)}{m_1}f$,	$\Delta=\frac{2D_2m_1(n_1+n_3)+D_1(m_1n_3-n_1)(m_1-1)}{2m_1(n_1+n_3)+(m_1n_3-n_1)(m_1-1)}$, $f=\frac{(D_1-D_2)m_1}{2m_1(n_1+n_3)+(m_1n_3-n_1)(m_1-1)}$,	Mezcla **(1) Mida la distancia objeto-imagen D_1, con $m_1=-1$;** **(2) Escoja otro par de puntos conjugados y mida D_2 y m_1.** **(3) Con o_1 e i_1, localice FPP y BPP.**
$n_1 = n_3$	$f=\frac{(D_2-\Delta)^2-\delta^2}{4(D_2-\Delta)}$, $\Delta=\frac{D_2(m+1)+\delta(m-1)}{m+1}$,	$f=\delta\frac{m}{m^2-1}$,	Mezcla, variante Método 3 **(1) Para un par de puntos conjugados, mida m.** **(2) Desplace el objeto δ, con D_2 fija. Mida δ.**
	$f=\frac{D_1-\Delta}{4}$, $f=\frac{(D_2-\Delta)^2-\delta^2}{4(D_2-\Delta)}$,	$\Delta=\frac{D_2^2-D_1D_2-\delta^2}{D_2-D_1}$, $f=\frac{1}{4}\frac{-(D_1-D_2)^2+\delta^2}{D_2-D_1}$,	Método de Gauss Método 1 **(1) Mida la distancia objeto-imagen D_1, a 4f; i.e., $m_1=-1$;;** **(2) Escoja otro par de puntos conjugados y mida D_2.** **(3) Desplace el objeto δ, con D_2 fija. Mida δ.**
	$\frac{(D_2-\Delta)^2-\delta_2^2}{4(D_2-\Delta)}=\frac{(D_3-\Delta)^2-\delta_3^2}{4(D_3-\Delta)}=f$,	$\Delta^2(D_3-D_2)+\Delta\left(\delta_3^2-\delta_2^2+D_2^2-D_3^2\right)+D_2D_3^2 - D_3D_2^2+D_3\delta_2^2-D_2\delta_3^2=0$,	Método de Gauss Método 2 **(1) Para un par de puntos conjugados, mida D_2.** **(2) Desplace el objeto δ_2, con D_2 fija. Mida δ_2.** **(3) Repita (1) y (2) para otro par de puntos conjugados.**

PARTE EXPERIMENTAL

Se analizó una lente telefoto tipo zoom, comercial, ver figura 2, Minolta 55 mm, 70–210 mm f/4 para formato completo de 35 mm, con una longitud de 152–168 mm. Se seleccionaron cuatro valores de distancia focal: 70, 100, 150 y 210 mm (estos valores están marcados en el cuerpo del objetivo), y para cada uno se realizaron cuatro mediciones, correspondientes a amplificaciones de 2X, 3X, 4X y 5X.

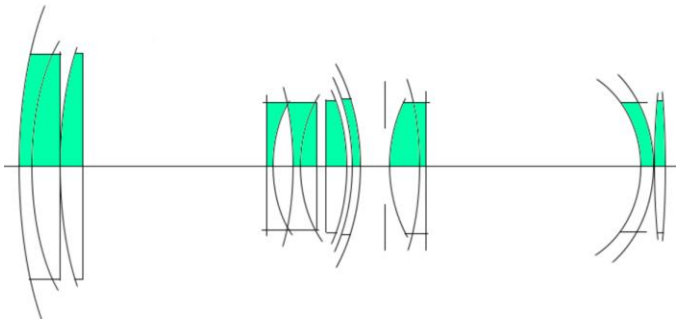


Fig. 2. Construcción óptica de la lente bajo prueba.

RESULTADOS

En la figura 3 se presentan los resultados de la medición de la distancia focal, donde se emplearon los tres métodos descritos anteriormente, utilizando la lente telefoto. Los valores indicados denotan el porcentaje absoluto medido para cada distancia focal seleccionada (se seleccionaron 4 diferentes valores de distancia focal); por ejemplo, un valor de 105.05% indica que el método arrojó un valor promedio 5.05% por arriba del valor actual (el valor impreso en el cuerpo de la lente telefoto). Estos valores están relacionados con la exactitud. Las barras de error, por su parte, representan la desviación estándar porcentual de cada grupo de cuatro mediciones para cada método la longitud de las barras denota la precisión de las mediciones.

La figura 3 muestra que la medición correspondiente a 70 mm fue la menos exacta para los tres métodos (Método 1 en azul, Método 2 en naranja y Método 3 en gris), mientras que la correspondiente a 210 mm fue la de mayor exactitud. En términos generales, el Método 1 resultó ser el más exacto. Además, el Método 1 produjo los resultados con la mayor precisión, mientras que el Método 3 generó los resultados con la menor precisión.

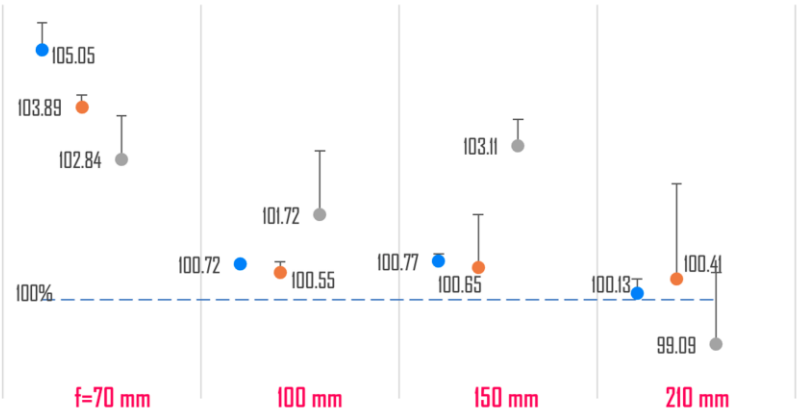


Fig. 3. Exactitud y precisión de 3 métodos, para 4 diferentes valores de distancia focal efectiva.

Al seleccionar una distancia focal efectiva de 70 mm, aplicamos el Método 2 para 16 valores diferentes de amplificación lateral dentro del intervalo de 2X a 5X. Dado que el Método 2 permite combinar cualquier par de pares de puntos conjugados, realizamos el cálculo de la distancia focal para el número total de combinaciones posibles. El resultado se muestra en la figura 4.

El eje horizontal representa la diferencia entre D_2 y D_3, según las ecuaciones del Método 2 de la Tabla 1. Puede observarse que, para el Método 2, el menor error se obtiene cuando las mediciones presentan una diferencia de al menos aproximadamente 7 cm entre D_2 y D_3.

La línea horizontal incluida en la figura indica el valor promedio, que es de 71.87 mm (equivalente al 102.67 % del valor nominal del valor de 70 mm, marcado en el cuerpo del objetivo).

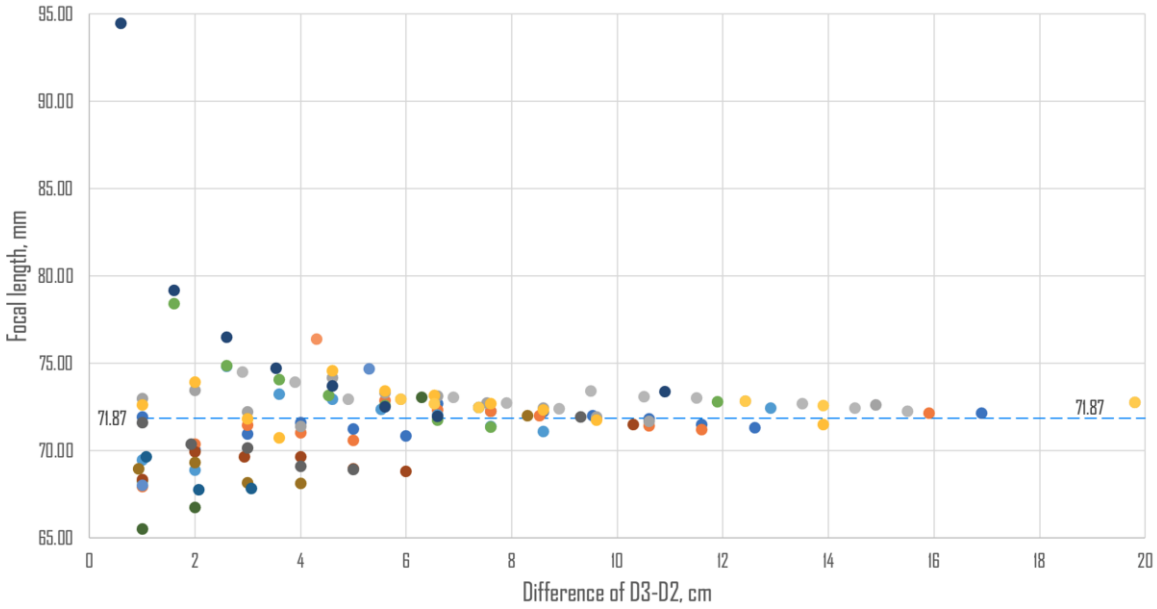


Fig. 4. Medición de la distancia focal efectiva de 70 mm, mediante el Método 2, de la Tabla 1.

CONCLUSIONES

Se presentaron fórmulas generales —que asumen medios diferentes rodeando a un sistema óptico— para los métodos de Gauss y de Abbe, además para un método que combina esos dos métodos. Estas fórmulas pueden ser usadas, por ejemplo, para caracterizar lentes oftálmicas. Además, se incluyen resultados preliminares para la medición de distancia focal efectiva de una lente telefoto, que emplea un método basado en combinaciones de posiciones conjugadas; la incertidumbre del método es de alrededor del 0.5%, en el mejor de los casos logrados.

BIBLIOGRAFÍA

1. F. E. Washer and W. R. Darling, “Factors affecting the accuracy of distortion measurements made on the nodal slide optical bench,” JOSA, Vol. 49, 6, 1959, pp. 517-534.
2. V. J. Doherty and P. D. Chapnik "Precision evaluation of lens systems using a nodal slide/MTF optical bench", Proc. SPIE 1531, Advanced Optical Manufacturing and Testing II, null, 1992, pp. 103-118.
3. W. J. Smith, “Modern Optical Engineering,” 2nd ed. McGraw-Hill, 1990; 3rd ed., 2000, pp. 495.
4. R. S. Sirohi, “On the methods to determine the focal length of an imaging system: A tutorial approach,” Asian J. Phys., Vol. 31, 1, 2022, pp. 1-16.

5. F. W. Bessel, “Über ein Mittel zur Bestimmung der Brennweite des Objectivglases eines Fernrohres,” Astronomische Nachrichten, Band XVII, No. 403, 1840, pp. 289–294.
6. C. F. Gauss, Dioptrische Untersuchungen, Göttingen: Dieterichschen Buchhandlung, 1841, pp. 1–34.
7. E. Abbe, "Apparat zur Bestimmung der Brennweite von Linsensystemen (Fokometer)", *Gesammelte Abhandlungen*, vol. II, 1904, pp. 215–218.
8. J. S. Anderson, "A magnification method of measuring focal length," Transactions of the Optical Society, Vol. 33, 2, 1931, pp. 55–62
9. S. M. Hazarika and R. S. Sirohi, “Focal length measurement using modified Bessel´s method,” In *Advances in Optical Science and Engineering*, *I*. Bhattacharya et al. (eds.), Springer Proceeding in Physics (2017), Vol. 194, pp. 659-667.
10. Y. Nakano and K. Murata, “Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens,” Appl Opt, 24, 1985, pp. 3162-3166.
11. K. V. Sriram, M. P. Kothiyal and R. S. Sirohi, “Direct determination of focal length by using Talbot interferometry,” Appl. Opt, 31(1992)5984-5987.
12. I. Glatt, and O. Kafri, “Determination of the focal length of nonparaxial lenses by moiré deflectometry,” Appl Opt, 26, 1987, pp. 2507-2508.
13. E. Keren, M. K. Kreske, and O. Kafri, “Universal method for determining the focal length of optical systems by moiré deflectometry,” Appl Opt, 27, 1988, pp. 1383-1385.
14. D. R. Neal, R. J. Copland, D. A. Neal, D. M. Topa, and P. Riera, “Measurement of lens focal length using multi-curvature analysis of Shack-Hartmann wavefront data,“ Proc SPIE, 5523, 243–255, 2004, In *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering V*, (14 October 2004);
15. J. Wu, J. Chen, A. Xu, X. Gao, and S. Zhuang, Focal length measurement based on Hartmann-Shack principle, Optik, 123, 2012, pp. 485-488.
16. Y. P. Kumar and S. Chatterjee, “Technique for the focal-length measurement of positive lenses using Fizeau interferometry,” Appl Opt, 48, 2009, pp. 730-736.
17. Z. Yang et al.,“Focal length measurement based on the wavefront difference method by a Fizeau interferometer,” Appl. Opt. 53, 25, 2014, pp. 5598–5605.
18. Gershon et al., “Method and apparatus for in vitro evaluation of focal length and focal length changes in lenses from human and animal eyes,” US patent 4,832,486, 1989.
19. G. Savini, L. Taroni, K. J. Hoffer, “Savini G, Taroni L, Hoffer KJ. Recent developments in intraocular lens power calculation methods-update 2020”, Ann. Transl. Med., 8, 2020, pp. 1553.
20. D. Gatinel, G. Debellemanière, A. Saad, M. Dubois, and R. Rampat, “Determining the Theoretical Effective Lens Position of Thick Intraocular Lenses for Machine Learning-Based IOL Power Calculation and Simulation,” Transl Vis Sci Technol. Apr 1;10(4), 2021, pp. 27.

NANOPARTÍCULAS DE PLATA DE DIFERENTES MORFOLOGÍAS INDUCIDAS POR FOTOREDUCCIÓN

L. F. Eslava-López[1,2], E. V. Mejía-Uriarte[1,2], R. Y. Sato-Berrú[2]

[1]Posgrado de Ingeniería Eléctrica - Sistemas Electrónicos, Universidad Nacional Autónoma de México, México, [2]Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

luis.eslava.23@gmail.com

RESUMEN

Se sintetizaron nanopartículas de plata (Nps-Ag) mediante fotorreducción asistida con diodos emisores de luz (*Light Emitting Diode* por sus siglas en inglés, LED) de diferentes longitudes de onda (470, 532 y 590 nm), logrando controlar su morfología. El proceso incluyó centrifugación a 10,000 revoluciones por minuto (10K RPM) para refinar el tamaño y la homogeneidad de las Nps-Ag formadas. Los espectros de absorción UV-Vis mostraron variaciones en la resonancia de los plasmones de superficie localizados (*Localized Surface Plasmon Resonance* por sus siglas en inglés, LSPR) después de haber sido expuestos a las diferentes longitudes de onda por 240 horas. Cuando la solución madre se expuso a 470 nm, las Nps-Ag se configuraron en estructuras esféricas/hexaédricas (LSPR = 495 nm, rosa/salmón). Una exposición a 532 nm de la misma solución presentó estructuras triangulares (LSPR = 564 nm, violeta) y con luz a 590 nm, las Nps-Ag formaron estructuras triangulares con puntas redondeadas (LSPR = 721 nm, cían). Esta metodología ofrece una ruta sencilla y reproducible para obtener Nps-Ag con diferentes morfologías, potencialmente utilizadas en aplicaciones opto-plasmónicas y fotónicas.

INTRODUCCIÓN

Cuando a las nanopartículas metálicas (Nps-M) se les hace incidir luz, los electrones en la superficie de las Nps-M son excitados por las ondas electromagnéticas. Estas interacciones generan oscilaciones colectivas de los electrones, conocidas como ondas plasmónicas superficiales. La forma de estas ondas puede ser obtenida por medio de un espectro de absorción UV-Vis, este espectro es conocido como Resonancia de Plasmones de Superficie Localizados, (*Localized Surface Plasmon Resonance* por sus siglas en inglés, LSPR). La posición del de mayor absorción, pico máximo, en longitud de onda y la estructura del espectro de absorción están relacionadas directamente con la forma y tamaño de las Nps-M.

En la actualidad, las Nps-M destacan por sus propiedades ópticas, eléctricas y térmicas, con aplicaciones en medicina, sensores y detección molecular [1]. Existen elementos con los que se pueden obtener Nps-M, por ejemplo, oro, plata, cobre, zinc, hierro, con formas esféricas, triangulares, hexaedros, barras, entre otras. En específico, las nanopartículas de plata (Nps-Ag) y oro son las más usadas para sensores optoplasmónicos por su alta compatibilidad biológica [2]. En este estudio se realizó una estandarización para la síntesis de Nps-Ag con tamaño uniforme y morfología controlada. Al irradiar la solución madre con fuentes LED (*Light Emitting Diode* por sus siglas en inglés) de ancho espectral estrecho se logró controlar la forma y el tamaño de las Nps-Ag. Como trabajo adicional, después de su generación, las Nps-Ag fueron centrifugadas para refinar su tamaño y morfología. Se obtuvieron los espectros de absorción UV-Vis de las muestras, donde se presentan las bandas de LSPR desplazadas.

TEORÍA

Reducción Química.

El método de reducción química nos permite sintetizar Nps en estado coloidal. Principalmente se requieren tres elementos: precursor, agente reductor y estabilizador [3]. Es importante controlar varios factores como; la temperatura, el pH para que la síntesis sea homogénea. Los agentes reductores más comunes que se utilizan son borohidruro de sodio, ácido ascórbico y polioles. Como agente estabilizante se suele usar PVP (polivinilpirrolidona**)** y como agente reductor se utiliza nitrato de plata. La morfología esférica es la más sencilla de sintetizar, para obtener un cierto tipo de morfología depende mucho de la preparación, el método de síntesis, la longitud de onda a la que se expone, tiempos de exposición y temperatura [4-8].

Las zonas de absorción que se muestran en el espectro de absorción son amplias; van desde 300 hasta 600 nm. En la síntesis de Nps-Ag triangulares, se usan los mismos agentes reductores. Sin embargo, el cambio de su morfología y tamaño, se observa en la estructura del espectro de absorción, teniendo una curva de absorción desde 300 hasta 800 nm. En algunos casos, se empieza con la síntesis de Nps esféricas y, a partir de esta forma, se aplican técnicas de fotoreducción para obtenerlas con forma triangular [9-13].

En todas las Nps-M se presenta la LSPR [14]. La forma, el tamaño y el entorno dieléctrico, e incluso de las interacciones electromagnéticas entre nanopartículas que estén muy cerca modifican sus propiedades de las Nps [15]. Mediante la técnica SERS(*Surface-Enhanced Raman Scattering* por sus siglas en inglés), se aprovecha la respuesta de los plasmones superficiales en superficies metálicas, por ello, su mayor aplicación es en sensores optoplasmónicos [16].

Nanopartículas

Las Nps son más pequeñas que la longitud de onda, de 1 a 100 nm de diámetro [17], pueden confinar la luz y mejoran su interacción con el material. En las Nps-M la luz incidente induce una oscilación colectiva de los electrones de la banda de conducción [18]; la forma de la onda de la oscilación depende del elemento o elementos que lo componen, de su forma y tamaño [19].

Espectroscopía de Resonancia de Plasmón de Superficie, LSPR.

La espectroscopía basada en la resonancia de plasmones superficiales localizada, LSPR (*Localized Surface Plasmon Resonance* por sus siglas en inglés), estudia las oscilaciones colectivas de electrones libres en nanopartículas metálicas (como Au, Ag, Cu) cuando son excitadas por luz. Estas oscilaciones generan un pico de absorción característico en el espectro UV-Vis, cuya posición depende del tamaño, forma, composición y entorno de la nanopartícula. A diferencia de la resonancia de plasmones de superficie (SPR, *Surface Plasmon Raman* por sus siglas en inglés), el LSPR es un fenómeno localizado, muy sensible a cambios en el índice de refracción del medio circundante [20].

Espectroscopia UV-Vis (Ultravioleta - visible)

La espectroscopia UV-Vis es una técnica que mide la absorción de radiación electromagnética en las regiones; ultravioleta (200-400 nm) y visible (400-700 nm) del espectro de una muestra. Se basa en la excitación de electrones de valencia de una molécula. Este método es ampliamente utilizado para determinar concentraciones de compuestos orgánicos e inorgánicos, estudiar la cinética de reacciones y caracterizar la LSPR de nanopartículas metálicas que aparece en el rango de 400 a 600 nm. La posición del pico de absorción depende del tamaño, de la forma, de la concentración y del índice de refracción del medio circundante [6, 21-23].

Modelo de Drude

Este fenómeno puede entenderse mediante el modelo de Drude, el cual describe el comportamiento óptico de los electrones libres en metales. En este modelo, los electrones libres se tratan como un gas clásico que responde a campos electromagnéticos externos. Según Drude, la permitividad dieléctrica del metal, $\varepsilon(\omega)$, varía con la frecuencia de la luz incidente. Cuando la frecuencia de la radiación coincide con la frecuencia natural de oscilación de los electrones libres en la nanopartícula, se produce una resonancia, conocida como LSPR, que genera un fuerte pico de absorción en el espectro UV-Vis [24-25].

Técnica de Centrifugación

Existen diferentes tipos de centrifugación; los más comunes son la centrifugación en gradiente de densidad y la centrifugación diferencial. La centrifugación en gradiente de densidad es una técnica que permite separar nanopartículas basadas en su densidad, es decir, en un mismo recipiente puede haber 2 o 3 medios de diferente densidad y con la centrifugación las nanopartículas se mueven y se posicionan en el punto del gradiente donde su densidad se iguala a la densidad del medio circundante [26-27]. La centrifugación diferencial es una de las técnicas de centrifugación más sencillas de usar, la muestra se centrifuga a velocidades determinadas y se llegará a separar de acuerdo a las propiedades físicas que tenga la muestra (tamaño, forma y densidad). Además, el tiempo es un parámetro importante, mientras más tiempo se centrifugue la muestra, más partículas se llegarán a separar, dejando las más pequeñas en la parte superior. Este proceso de separación en la centrifugación se conoce como: sedimento o precipitado, que son las partículas que caen por la fuerza de centrifugación, y a la parte superior del coloide donde quedan las partículas más pequeñas se le llama sobrenadante [28]. La combinación de la velocidad de centrifugación y el tiempo de centrifugación permite que las partículas más pequeñas se separen de las partículas más grandes y pesadas. La centrifugación diferencial funciona bien cuando la muestra contiene nanopartículas con una marcada diferencia de tamaño y peso. En coloides de tamaño similar, la separación es mínima [29].

PARTE EXPERIMENTAL

El método que se usó fue mediante ruta química; para la solución madre se emplearon tres reactivos: citrato de sodio, 1 mM, como estabilizador; borohidruro de sodio, 0.1 mM, como reductor; y nitrato de plata, 0.1 mM, como precursor. Estos tres reactivos fueron disueltos en 1 L de agua desionizada. La solución obtenida es conocida como “Solución madre” y fue utilizada en este trabajo.

La solución madre se vertió en viales de 5 mL y fue expuesta a la luz LED de diferentes longitudes de onda durante 240 horas continuas, y a la solución madre después de ser expuesta a las fuentes LED se le llama coloide inicial. Con la finalidad de modificar su morfología, a este proceso físico se le conoce como fotoreducción. Las longitudes de onda que se usaron para exponer las nanopartículas fueron de 470, 532 y 590 nm, con una potencia de 253, 111 y 109 mW respectivamente. Estas lámparas LED tienen un FWHM de 30 nm. Para que los resultados sean reproducibles, este mismo proceso se realizó en tres oportunidades. Se obtuvieron un total de 9 frascos, 3 de cada longitud de onda. La exposición a las diferentes longitudes de onda de la solución madre se muestra en la figura 1.

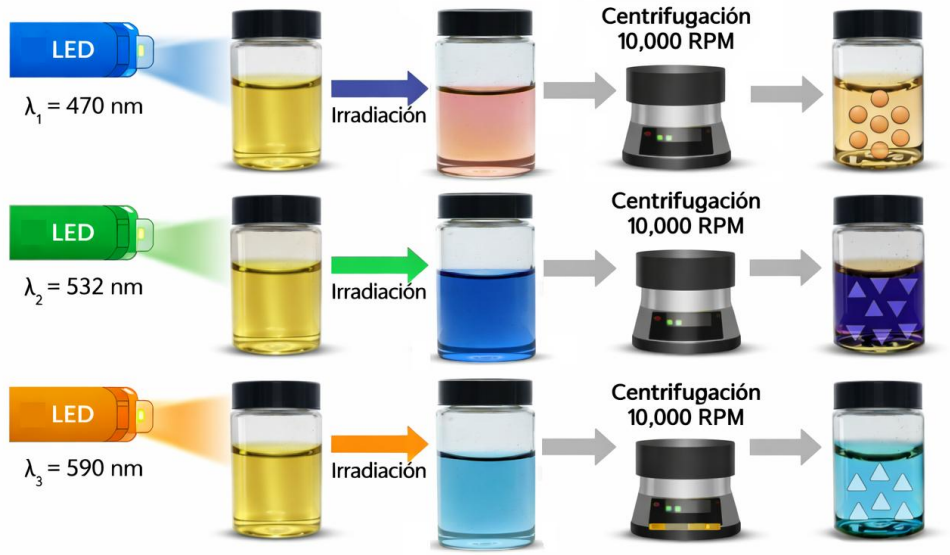


Figura 1. Exposición de luz LED de diferentes longitudes de onda a la solución madre y centrifugación a 10K RPM.

Como trabajo adicional, a las nanopartículas fotoreducidas se aplicó el proceso de centrifugación a 10K RPM, con el fin de refinar el tamaño de las nanopartículas, ver figura 2.

Se obtuvieron los espectros de absorción UV-Vis de la solución madre, así como después de la exposición a las lámparas LED es decir el coloide inicial y después de centrifugar con el equipo HR4000CG-UV-NIR de Ocean Optics.



Figura 2. Centrifugadora Hermle Labortechnik GmbH (Wehingen, Germany) con un rotor modelo 221.23V01, con capacidad para 12 tubos de 1.5 ml y un radio máximo de 6.5 cm.

RESULTADOS

Se obtuvieron los espectros de absorción UV-Vis, en los que se muestra la LSPR de cada muestra. En la figura 3, se muestra el espectro de absorción de la solución madre antes de ser expuesta a la luz LED.

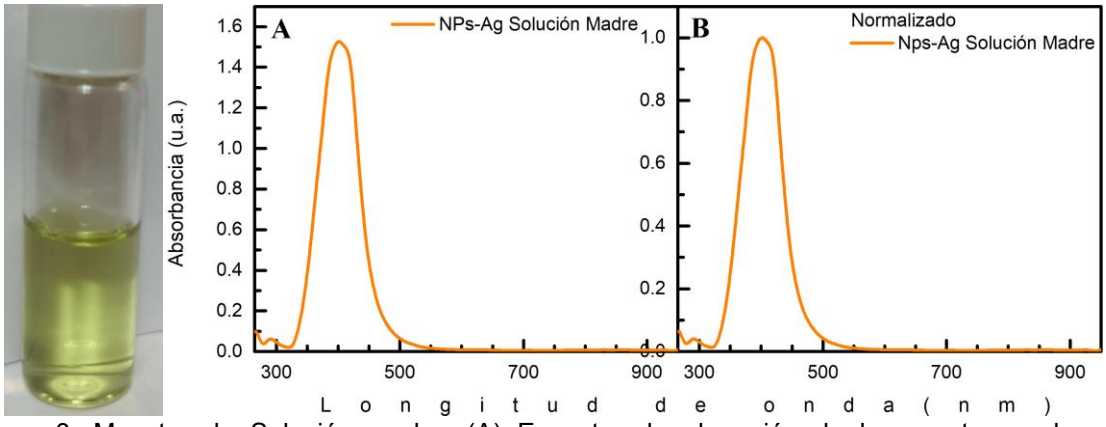


Figura 3. Muestra de Solución madre, (A) Espectro de absorción de la muestra madre, (B) Normalización de la figura A.

Las nanopartículas expuestas a una longitud de onda de: 470, 532 y 590 nm presentaron un cambio en su espectro de absorción (LSPR) en 503, 575 y 688 nm, respectivamente. Cada lámpara generó diferentes formas y tamaños de Nps-Ag que están relacionadas a un color determinado.



Figura 4. Nanopartículas de plata expuesta a 470, 532 y 590 nm, después de ser centrifugadas a 10K RPM, de izquierda a derecha respectivamente.

Después de la fotoreducción, el FWHM del espectro de absorción de las nanopartículas se estrechó con respecto al espectro de la solución madre, al finalizar el proceso de centrifugación, el FWHM del espectro de absorción se estrechó aún más. De la literatura publicada se conoce que las Nps-Ag expuestas a 470 nm forman una morfología esférica y hexaédrica (rosa/salmón); Después de la fotoreducción, su pico de absorción está en 503 nm, (FWHM ~49 nm), luego del proceso de centrifugado su FWHM disminuyó a 48 nm y su pico de absorción se desplazó aproximadamente 8 nm hacia el UV, como resultado se obtuvo un 38% del coloide inicial, ver figura 5.

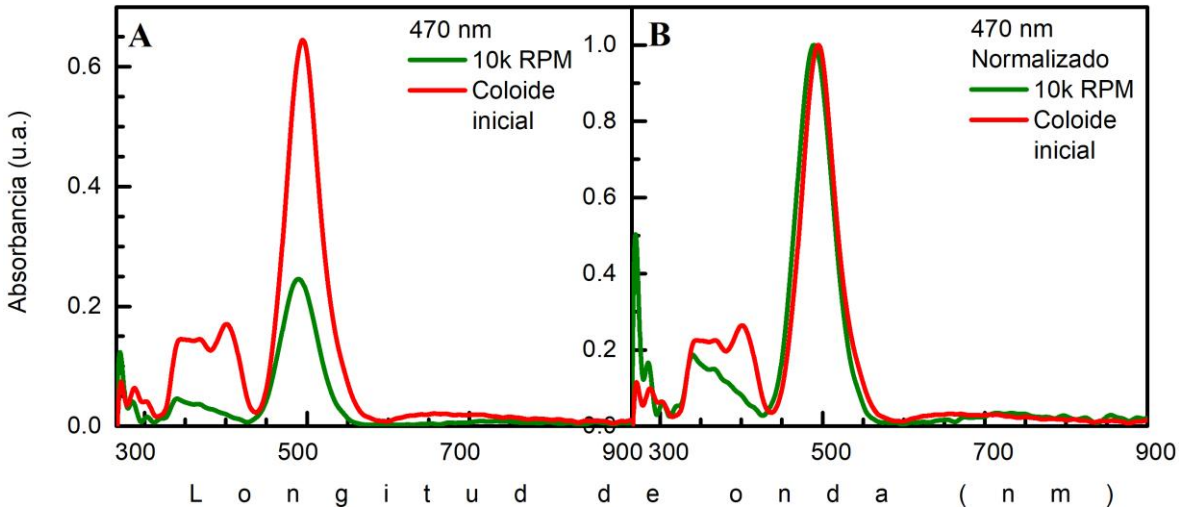


Figura 5. (A) Comparación de Nps-Ag expuestas a 470 nm, y centrifugadas a 10K RPM. (B) Comparación normalizada de la muestra presentada en A.

Las NPs-Ag expuestas a 532 nm obtienen una morfología triangular (violeta); Después de la fotoreducción, su pico de absorción está en 575 nm, (FWHM ~87 nm), luego del proceso de centrifugado su FWHM disminuyó a 84 nm y, el pico de absorción se desplazó aproximadamente 8 nm hacia el UV, obteniéndose un 76% del coloide inicial, ver figura 6.

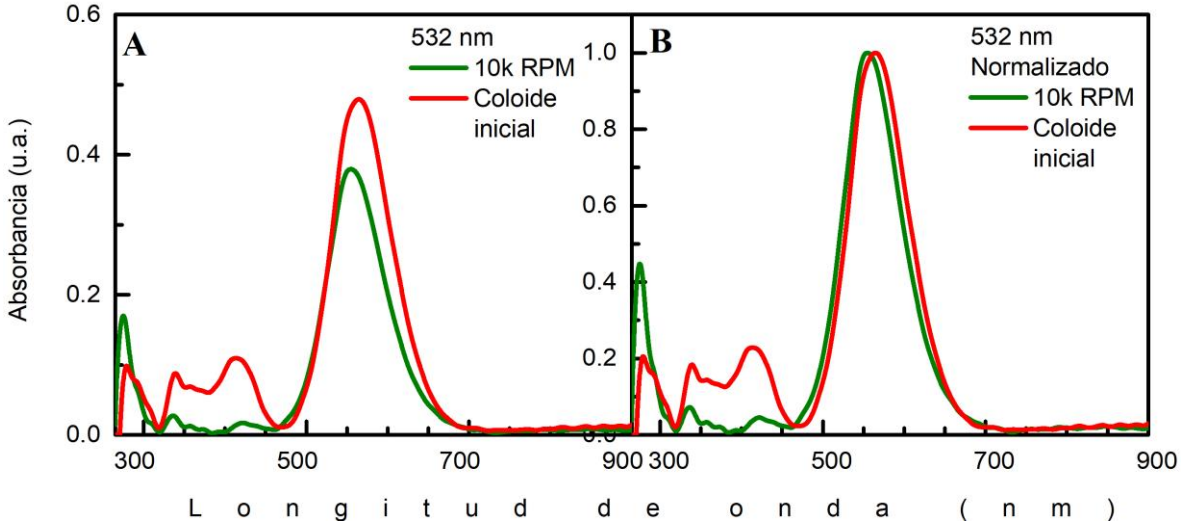


Figura 6. (A) Comparación Nps expuestas a 532 nm, y centrifugadas a 10K RPM. (B) Comparación normalizada de la muestra presentada en A.

Las Nps-Ag expuestas a 590 nm generan una morfología triangular con puntas redondeadas (azul/cían) [30]; Después de la fotoreducción, su pico de absorción está en 688 nm, (FWHM ~259 nm), luego del proceso de centrifugado su FWHM disminuyó a 192 nm y su pico de absorción se desplazó aproximadamente 45 nm hacia el UV, y se obtuvo un 45% del coloide inicial, ver figura 7.

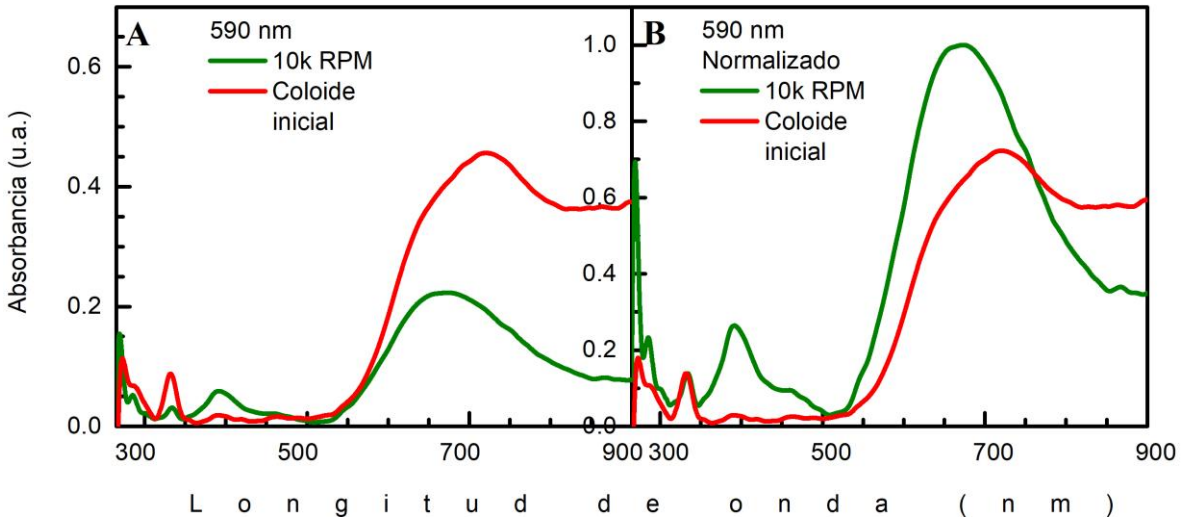


Figura 7. (A) Comparación Nps expuestas a 590 nm, y centrifugadas a 10K RPM. (B) Comparación normalizada de la muestra presentada en A.

CONCLUSIONES

Con este proceso se logró sintetizar Nps-Ag de forma sencilla y reproducible, logrando un control sobre la morfología mediante la exposición a la luz LED selectiva. La fotorreducción presenta una alternativa accesible y versátil para optimizar la síntesis de Nps-Ag destinados a aplicaciones en optoelectrónica, fotónica, etc.

El proceso de centrifugación permite refinar las nanopartículas en tamaño y forma. Esta separación cambia el color del coloide, en estas muestras se hizo más transparente, lo que indica que el tamaño de las nanopartículas es más homogéneo.

Estos procesos de fotorreducción y centrifugado cambian las características de las nanopartículas; la luz LED modifica la morfología; el centrifugado refina su tamaño y forma. La facilidad de replicar la síntesis es relativamente sencilla, por lo que es una propuesta para la aplicación en sensores optoplasmónicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. W. C. Zhang, et al. “Self-organized formation of silver nanowires, nanocubes and bipyramids via a solvothermal method”, Acta Materialia, (2008), 56(9), 1955-1962.
2. S. B. Yaqoob, et al. “Gold, silver, and palladium nanoparticles: A chemical tool for biomedical applications”, Frontiers in Chemistry, (2020), 8, 376.
3. R. M. Vemal, Y. C. Kuan, & A. R. Khairunisak, “Chemical reduction methods for synthesizing Ag and Al nanoparticles and their respective nanoalloys”, Materials Science and Engineering: B, (2011), 176(20), 187–203.
4. A. T. Dhiwahar, et al. “Improved photocatalytic degradation of rhodamine B under visible light and magnetic properties using microwave combustion grown Ni doped copper ferrite spinel nanoparticles”, Solid State Sciences, (2021), 113, 106542.
5. Q.-J. Luo, et al. “A highly sensitive, dual-signal assay based on rhodamine B covered silver nanoparticles for carbamate pesticides”. Chinese Chemical Letters, (2017), 28(2), 345–349.
6. K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao, & G. C. Schatz, “The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment”, The Journal of Physical Chemistry B, (2003), 107(3), 668–677.
7. A. Fares, et al. “A new technique for using gamma irradiation to enhance silver nanoparticles synthesized by chemical reduction and their effect on tomato early blight disease under field conditions”, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, (2024), 58, 103128.
8. V. Suman, M. Rusu, & L. Ghimpu, “Colloidal silver nanoparticles synthesized by chemical reduction method”, Acta Physica Polonica A, (2024), 146(4), 446.
9. M. Gao, et al. “Controlled synthesis of Ag nanoparticles with different morphologies and their antibacterial properties”, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, (2013), 24(2), 351–357.
10. H. N. Baghban, et al. “One-drop micro-array towards accelerated optical quantification of dopamine in human biofluids using triangular silver nanoparticles: Smartphone-assisted biomedical analysis by colorimetric sensing and Lab-on-paper technology”, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, (2024), 453, 155960.
11. S. Liu, et al. “Colorimetric sensor array for sensitive detection and identification of bacteria based on the etching of triangular silver nanoparticles regulated by Cl^- at various concentrations”, Journal of Hazardous Materials, (2024), 460, 132000.
12. A. Dghoughi, et al. “Synthesis of triangular lignin photonic crystal nanoparticles: Investigating solvent effects and dialysis optimization”. International Journal of Biological Macromolecules, (2025), 251, 129123.
13. R. Y. Sato-Berrú, et al. “Synthesis of Silver Colloids with a Homemade Light Source”, Journal of Cluster Science, (2018), 29(4), 719–724.
14. N. H. Nam, & N. H. Luong, “Nanoparticles: synthesis and applications”, Materials for Biomedical Engineering. (2019). 211–240.
15. J. Ren & R. D. Tilley, “Preparation, self-assembly, and mechanistic study of highly monodispersed nanocubes”, Journal of the American Chemical Society, (2007), 129(11), 3287–3291.
16. B. Sharma, et al. “SERS: Materials, applications, and the future”, Materials Today, (2012), 15(1–2), 16–25.
17. G. Ortíz-Vargas, S. Guillen-Tinoco & C. Olvera-Carranza, “Dispositivos a nanoescala: una aproximación práctica a las nanopartículas a base de polisacáridos de fructosa”, Biotecnología en movimiento, (2022), Núm 29_4
18. W. Barnes, A. Dereux & T. Ebbesen, “Surface plasmon subwavelength optics.”, Nature Publishing Group, (2003), Vol 424, 824–830

19. Xavier, et al. “Advances in optoplasmonic sensors - combining optical nano/microcavities and photonic crystals with plasmonic nanostructures and nanoparticles”, Nanophotonics, Vol. 7, No. 1, (2018), pp. 1-38.
20. J. Congran, et al. “Plasmonic nanosensors for point-of-care biomarker detection”, Materials Today Bio 14 (2022), 100263.
21. R. Y. Sato Berrú, E. Mejía Uriarte, A. Vázquez Olmos, E. Mata Zamora y J. Villa Manríquez. “Uso de filtros orgánicos en la fotoagregación de nanopartículas de plata”, Revista Mexicana de Física E, (2015), vol. 61, no. 3, pp. 228–233.
22. T. Gómez-Quintero, et al. “Nanopartículas de plata: Aplicaciones biomedicas”, Química Hoy Chemistry Sciences., (2013), Vol. 3, No. 3.
23. M. Toledo. “UV/Vis Spectrophotometry: Fundamentals and Applications”, METTLER TOLEDO. (2018).
24. S. Enoch, N. Bonod. “Plasmonics: From basics to advanced topics”. Springer Series in Optical Sciences. (2012), Vol. 167.
25. Y. Ando, S. Kishimoto & S. Ohnuki. “Plasmon analysis for metallic nanocylinders using hydrodynamic Drude model”, ISAP, (2020) pp. 569-660.
26. J. Gao, et al. “Generation, purification and engineering of extracellular vesicles and their biomedical applications”, Methods 177 (2020), 114-125.
27. Y. Haiqing, et al. “Capitalizing Resolving Power of Density Gradient Ultracentrifugation by Freezing and Precisely Slicing Centrifuged Solution: Enabling Identification of Complex Proteins from Mitochondria by Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry”, Journal of Analytical Methods in Chemistry, (2016), 8183656, 7 pages.
28. L. Seguí Gil, “Centrifugación a escala de laboratorio”, Universitat Politècnica de València (2022)
29. M. Livshits, E. Khomyakova, E. Evtushenko, et al. “Isolation of exosomes by differential centrifugation: Theoretical analysis of a commonly used protocol”, Sci Rep 5, (2015), 17319.
30. R. Y. Sato-Berrú, E. V. Mejía-Uriarte, A. R. Vázquez-Olmos, et al. “Colorimetric Research of Silver Colloids”, J Clust Sci, (2022), 33, 1969–1975

NÚMEROS DIFUSOS EN PROCESOS DE DECISIÓN DE MARKOV

Carlos Camilo Garay[1], Hugo A. Cruz Suárez[2]

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
[1]ccamilo@fcfm.buap.mx, [2]hcs@fcfm.buap.mx

RESUMEN

En este trabajo se dará una introducción a los números difusos aplicados a los procesos de decisión de Markov. Estos procesos son ampliamente conocidos y usados en áreas como economía, finanzas e ingeniería, entre otras; éstos se utilizan para optimizar costos o maximizar ganancias, según sea nuestro problema de control. Se darán condiciones necesarias para optimizar un criterio de rendimiento también conocido como función objetivo, esto a través de un método conocido ampliamente como programación dinámica. Por su parte, los números difusos son utilizados cuando no se tiene información precisa y éstos ayudan a cuantificar los datos para poder manejarlos matemáticamente. Asimismo, se abordarán estas teorías mediante un ejemplo numérico.

INTRODUCCIÓN

Los Procesos de Decisión de Markov (PDM), también conocidos como Markov Decision Processes (MDP), constituyen una herramienta matemática fundamental para modelar sistemas dinámicos en los cuales un agente u observador debe tomar decisiones secuenciales bajo condiciones de incertidumbre. En este tipo de modelos, el sistema evoluciona a través de diferentes estados y cada decisión tomada influye en la transición hacia estados futuros, generando costos o recompensas asociadas. El objetivo principal consiste en encontrar una política de control óptima que minimice costos o maximice beneficios a largo plazo.

Sin embargo, en numerosos problemas reales, la información disponible no es completamente precisa. En aplicaciones industriales, económicas o de ingeniería, es común que los costos asociados a las decisiones no puedan determinarse mediante valores exactos, sino que se representen mediante estimaciones aproximadas o inciertas. Ante esta problemática, la teoría difusa ofrece un marco matemático adecuado para representar incertidumbre e imprecisión.

El presente trabajo tiene como finalidad analizar la incorporación de números difusos dentro de los Procesos de Decisión de Markov, enfatizando el papel de los costos difusos en la toma de decisiones óptimas. Asimismo, se estudia un ejemplo aplicado relacionado con la operación eficiente de una máquina, en el cual se evalúa la conveniencia de reparar o no un sistema deteriorado bajo criterios de costo incierto.

TEORÍA

Un modelo de decisión de Markov se define como:

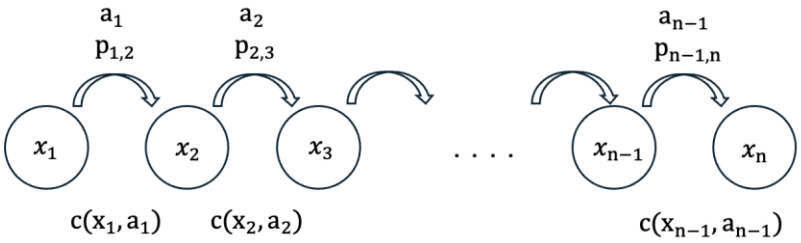
$$\mathcal{M} = (\boldsymbol{X}, \boldsymbol{A}, \{\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}): \boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X}\}, \boldsymbol{P}, \boldsymbol{C})$$

donde $\boldsymbol{X}$ es el espacio de estados el cual puede ser finito o numerable, $\boldsymbol{A}$ el conjunto de acciones, $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$ las acciones admisibles, $\boldsymbol{P}$ la ley de transición y $\boldsymbol{C}$ una función de costos.

El Modelo de Decisión de Markov representa un sistema estocástico controlado que se observa a través del tiempo, el desarrollo se puede describir de la siguiente manera. Si en el tiempo de la $\boldsymbol{n}$ −ésima época de decisión el sistema se encuentra en el estado $\boldsymbol{x_n} = \boldsymbol{x}$, el controlador elige una acción $\boldsymbol{a_n} = \boldsymbol{a}$ y sucede lo siguiente: el sistema permanece en el estado $\boldsymbol{x}$ durante un tiempo finito

generándose un costo inmediato $\boldsymbol{C(x,a)}$, que depende del estado y la acción, el sistema se mueve a un nuevo estado $\boldsymbol{x_{n+1} = x'}$ de acuerdo con la ley de transición $\boldsymbol{P}$, una vez ocurrido lo anterior, el proceso se repite. La Figura 1 muestra esta dinámica.

Figura1. Dinámica de un PDM



A la sucesión de controles que el proceso genera se le conoce como política; que es una regla mediante la cual se elige una acción en cada punto de observación del proceso. Para evaluar la calidad de cada política se cuenta con un criterio de rendimiento, que mide la eficiencia de ésta en función de los costos que genera. Formalmente, una política de control $\boldsymbol{\pi}$ determina la acción a aplicar en cada instante. Una $\boldsymbol{política\ de\ control\ \pi = \pi_n}$ es una sucesión de acciones, tal que $\boldsymbol{\pi_n(A(x_n) \mid h_n) = 1}$, para cada $\boldsymbol{h_n \in \mathbb{H}_n, n = 0, 1, \ldots}$. Donde $\mathbb{H}_n$ representa el espacio de historias admisibles hasta el tiempo $\boldsymbol{n}$.

Se denota por $\boldsymbol{\Pi}$ al conjunto de todas las políticas. Sea $\mathbb{F}$ el conjunto de todas las funciones Borel medibles $\boldsymbol{f: X \to A}$ tal que $\boldsymbol{f(x) \in A(x)}$ para todo $\boldsymbol{x \in X}$. Las funciones en $\mathbb{F}$ se conocen como selectores del conjunto de valores que mapean $\boldsymbol{x \to A(x)}$.

Una política $\boldsymbol{\pi = \{\pi_n\} \in \Pi}$ se dirá:

a) **Markoviana Aleatorizada**. Si existe una sucesión $\{\boldsymbol{\varphi_n}\}$ de kérneles estocásticos $\boldsymbol{\varphi_n \in \Phi}$, tales que,

$$\boldsymbol{\pi_n(\cdot \mid h_n) = \varphi_n(\cdot \mid x_n)}, \qquad (1)$$

para toda $\boldsymbol{h_n \in \mathbb{H}_n}$ y $\boldsymbol{n \geq 0}$.

b) **Markoviana Aleatorizada Estacionaria**. Si (1) se cumple para un kérnel estocástico $\boldsymbol{\varphi \in \Phi}$ independiente de $\boldsymbol{n}$, es decir, $\boldsymbol{\pi_n(\cdot \mid h_n) = \varphi(\cdot \mid x_n)}$ para toda $\boldsymbol{h_n \in \mathbb{H}_n}$y $\boldsymbol{n \geq 0}$.

c) **Determinista Markoviana Estacionaria**. Si existe un selector $\boldsymbol{f \in \mathbb{F}}$ tal que $\boldsymbol{\pi_n(\cdot \mid h_n)}$ es la medida de Dirac en $\boldsymbol{f_n(x_n) \in \mathbb{A}(x_n)}$ para cada $\boldsymbol{h_n \in \mathbb{H}_n}$ y $\boldsymbol{n \geq 0}$.

Donde $\boldsymbol{\Phi}$ es el conjunto de todos los kérneles estocásticos $\boldsymbol{\varphi}$ en $\boldsymbol{P(\mathbb{A} \mid \mathbf{X})}$tales que para toda $\boldsymbol{x \in X}$ se tiene que $\boldsymbol{\varphi(\mathbb{A}(x) \mid x) = 1}$. Así, se tiene que $\boldsymbol{\mathbb{F} \subset \Phi}$. Sin pérdida de generalidad, cualquier política estacionaria $\boldsymbol{\pi = (f, f, \ldots)}$ se identificará con $\boldsymbol{f \in \mathbb{F}}$, ver [3].

El $\boldsymbol{problema\ de\ control\ óptimo}$ (PCO) asociado al modelo de Decisión de Markov $\boldsymbol{\mathcal{M}}$ se define de la siguiente manera. Considere $\boldsymbol{\pi \in \Pi}$ y $\boldsymbol{x \in X}$, y defina el $\boldsymbol{costo\ total\ esperado\ descontado}$ como

$$\boldsymbol{v(x,\pi) := \mathbb{E}_{x,\pi}\left[\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t\, C(x_t, a_t)\right]}, \qquad (2)$$

Considerar el criterio de rendimiento (2), el PCO consiste en determinar una política $\boldsymbol{\pi_o}$ tal que:

$$v(x, \pi_o) = \inf_{\pi \in \Pi} v(x, \pi),$$

π_o se llamará una $\boldsymbol{política\ óptima}$. La función V_o definida por:

$$V_o(x) := v(x, \pi_o).$$

se llamará $\boldsymbol{función\ de\ valor\ óptimo}$. Para que en el problema de control existan políticas óptimas, es decir que minimicen el criterio de rendimiento, se necesitan las siguientes suposiciones

Suposición.

1. La función de costos C es semicontinua inferiormente, no-negativa e inf-compacta sobre $\mathbb{K}$.
2. La ley de transición P es fuertemente continua.
3. Existe una política $\pi \in \Pi$ tal que $v(x, \pi) < \infty, \boldsymbol{para\ cada}\ x \in X$.

Teorema

Bajo los supuestos estándares anteriormente mencionados, se cumplen las siguientes afirmaciones.

a) La función de valor óptimo V_o satisface la siguiente ecuación de programación dinámica,

$$V_o(x) = \min_{a \in A(x)} \left[C(x, a) + \beta \int_X V_o(y)\, P(dy \mid x, a) \right], \tag{3}$$

para cada $x \in X$.

b) Existe $f_o \in \mathbb{F}$ tal que $f_o(x) \in A(x)$ alcanza el mínimo en (3), es decir, para cada $x \in X$:

$$V_o(x) = C\big(x, f_o(x)\big) + \beta \int_X V_o(y)\, P\big(dy \mid x, f_o(x)\big).$$

La prueba de este resultado se puede consultar en [1].

TEORÍA DIFUSA

Sea Λ un conjunto no vacío; un conjunto difuso Γ en Λ se define en términos de su función de pertenencia Γ', que asigna a cada elemento de Λ un valor real del intervalo $[0, 1]$. El α-corte de Γ, denotado por Γ_α, se define como el conjunto

$$\Gamma_\alpha := \{x \in \Lambda \mid \Gamma'(x) \geq \alpha\}, \quad (0 < \alpha \leq 1).$$

Un número difuso Γ es un conjunto difuso definido sobre el conjunto de los números reales $\mathbb{R}$ que satisface las siguientes propiedades,

a) Γ' es normal, es decir, existe $x_0 \in \mathbb{R}$ tal que $\Gamma'(x_0) = 1$;
b) Γ' es convexo, es decir, Γ_α es convexo para todo $\alpha \in [0, 1]$;
c) Γ' es semicontinuo superior;
d) Γ_0 es compacto.

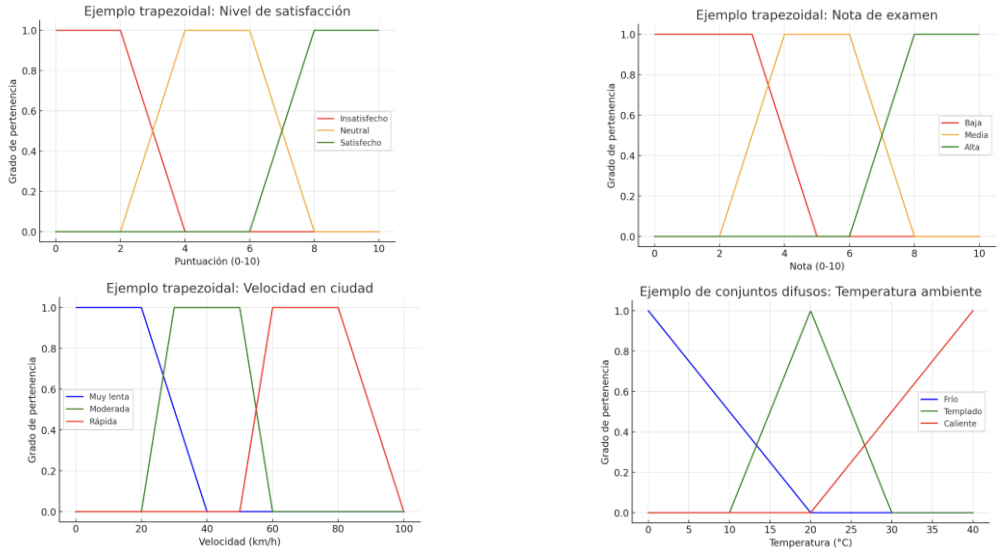
Un número difuso Γ se llama *número difuso* **trapezoidal** si su función de pertenencia tiene la siguiente forma:

$$\Gamma'(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l, \\ \dfrac{x - l}{m - l}, & l < x \leq m, \\ 1, & m < x \leq n, \\ \dfrac{p - x}{p - n}, & n < x \leq p, \\ 0, & x > p, \end{cases}$$

con $\boldsymbol{l} < \boldsymbol{m} \leq \boldsymbol{n} < \boldsymbol{p}$ reales. Un número difuso trapezoidal se denota simplemente como $(\boldsymbol{l}, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{n}, \boldsymbol{p})$. Un número difuso **triangular** se define cuando $\boldsymbol{m} = \boldsymbol{n}$, ver [2] y [4].

Ejemplos clásicos de números difusos trapezoidales y triangulares se pueden ver en la Figura 2.

Figura 2. Ejemplos de número difusos trapezoidales y triangulares.



La Figura 2 ilustra tres ejemplos de conjuntos difusos trapezoidales; la figura de la parte superior izquierda representa el nivel de satisfacción que una persona puede tener al final de un cierto servicio, entre ellas: Insatisfecho, Neutral y Satisfecho, los cuales son conjuntos difusos debido a que la satisfacción es un concepto subjetivo. De la misma forma, la imagen de la parte superior derecha representa las notas de un examen que un alumno puede tener en su evaluación: Baja, Media y Alta. Asimismo, la imagen de la parte inferior izquierda representa la velocidad a la que una persona puede ir en su automóvil: Lenta, Moderada y Rápida. Finalmente, la imagen de la parte inferior derecha ilustra un número difuso triangular el cual representa la temperatura ambiente de un lugar: Frío, Templado y Caliente. Estos cuatro conjuntos difusos son subjetivos a cada persona, por lo que no hay una medida exacta cuando se habla de cada concepto o término.

EJEMPLO

a) Considerar el problema de operación eficiente de una máquina en donde se tienen dos únicas acciones disponibles: *reparar, no reparar*.
b) El objetivo ese decidir sobre el nivel de deterioro en el cual vale la pena pagar el costo de reparación para obtener costos mínimos de operación.
c) Dentro de este contexto se tiene el siguiente problema:

No reparar → barato hoy pero caro después
Reparar → caro hoy pero barato después.

El espacio de estados para este ejemplo estará conformado por los estados

$$\boldsymbol{X} = \{\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}\}$$

donde $\boldsymbol{x_1}$ representa el estado en que la máquina está funcionando; $\boldsymbol{x_2}$ representa, por el contrario, que la máquina esté descompuesta (dañada/deteriorada). Bajo esta formulación se pueden considerar las siguientes acciones según el estado en el que se encuentre la máquina:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x_1}) = \{\boldsymbol{a_1}\} \text{ (no reparar)}$$

$$\boldsymbol{A(x_2) = \{a_2, a_1\}}\ \text{(reparar, no reparar)}$$

Las probabilidades de transición desde $\boldsymbol{x_1}$:

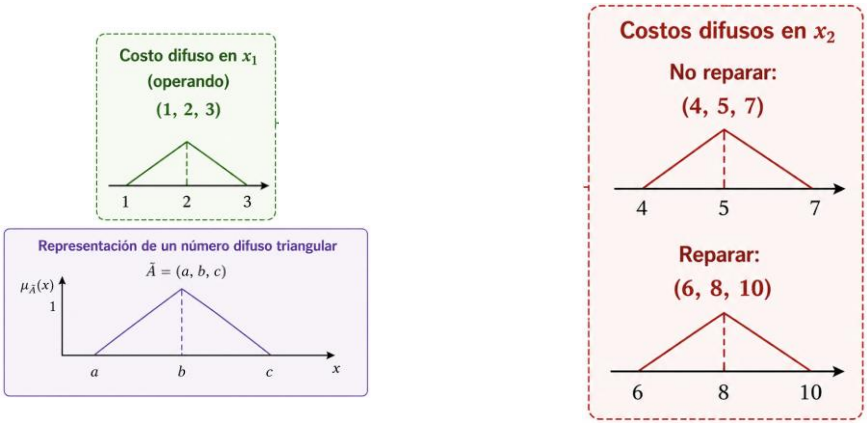
$$\boldsymbol{P(x_1|x_1,\ a_1) = 0.8 \quad P(x_2|x_1,\ a_1) = 0.2,}$$

y desde $\boldsymbol{x_2}$:
Si se decide reparar: $\boldsymbol{P(x_1|x_2,\ a_2) = 1,}$
Si no se decide reparar: $\boldsymbol{P(x_2|x_2,\ a_1) = 1.}$

Números difusos triangulares:

a) En $\boldsymbol{x_1}$ (operando): $\boldsymbol{\tilde{c}(x_1,\ a_1) = (1, 2, 3)}$
b) En $\boldsymbol{x_2}$ y sin reparar: $\boldsymbol{\tilde{c}(x_2,\ a_1) = (4, 5, 7)}$
c) En $\boldsymbol{x_2}$ y reparar máquina: $\boldsymbol{\tilde{c}(x_2,\ a_2) = (6, 8, 10)}$

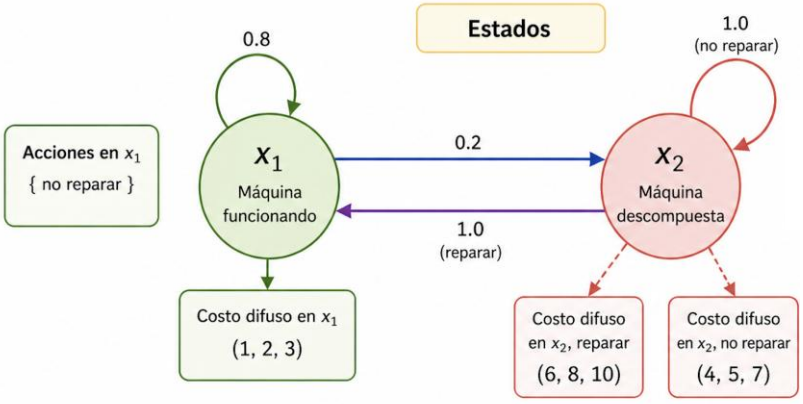
Figura 3. Representación de costos difusos triangulares.



En la Figura 3 se ilustran los costos difusos que implicarían reparar o no la máquina, dependiendo del estado actual, ya sea $\boldsymbol{x_1}$ o $\boldsymbol{x_2}$ y la acción correspondiente a cada estado.

Bajo este contexto, en la Figura 4 se aprecia la dinámica del sistema para el funcionamiento de la máquina con dos estados, dos acciones admisibles, probabilidades de transición correspondientes y costos triangulares difusos.

Figura 4. Dinámica del sistema de funcionamiento de una máquina con dos estados.



Considerar la ecuación (3) el caso discreto, es decir, el espacio de estados y acciones discretos, así, (3) se convierte en:

$$\tilde{V}(x) = \min_{a \in A(x)} \left\{ \tilde{c}(x,a) + \beta \sum_{x'} P(x'|x,a)\tilde{V}(x') \right\},$$

con $\beta = 0.9$, se determina una política mediante el principio de Bellman usando recursión hacia adelante. Se inicializa en $\tilde{V}_0(x_i) = (0,0,0)$, para $i = 1,2$.

Tabla 1. Iteración de valores para la función $\tilde{V}(x)$.

Iteración	$\tilde{V}(x_1)$	$\tilde{V}(x_2)$	Acción
0	(0,0,0)	(0,0,0)	-
1	(1,2,3)	(4,5,7)	a_1
2	(2.44, 4.34, 6.42)	(7.6, 9.5, 13.3)	a_1
3	(4.12, 6.83, 10.02)	(8.20, 11.91, 15.78)	a_2
4	(5.45, 9.06, 13.05)	(9.71, 14.15, 19.01)	a_2
5	(6.67, 11.07, 15.82)	(10.90, 16.16, 21.75)	a_2

La interpretación de la Tabla 1 es de la siguiente forma.

1. Bajo x_2, en la iteración 1 y 2 parecía mejor no reparar. A partir de la iteración 3 en adelante reparar domina, así, si el sistema se encuentra en el estado x_2, es mejor reparar, pues esto genera costos mínimos a largo plazo.
2. Los valores $\tilde{v}(x)$ son costos esperados difusos por lo que en cada política no se obtiene un número exacto, sino un vector que representan los costos difusos, es decir los valores menos probables, moderadamente y más probables que costaría reparar o no la máquina dependiendo del estado en el que se encuentre el sistema.

CONCLUSIONES

Los Procesos de Decisión de Markov constituyen una herramienta robusta para modelar problemas de control y toma de decisiones bajo incertidumbre. La incorporación de teoría difusa permite extender estos modelos clásicos hacia situaciones más realistas, especialmente cuando los costos no pueden determinarse de manera exacta.

El uso de números difusos triangulares y trapezoidales ofrece una representación flexible de la incertidumbre, permitiendo modelar escenarios donde únicamente se cuenta con aproximaciones o estimaciones.

El ejemplo de la máquina evidencia cómo una decisión aparentemente costosa en el corto plazo puede representar la alternativa óptima al considerar horizontes temporales amplios. En este sentido, la integración de costos difusos dentro de los Procesos de Decisión de Markov proporciona una herramienta valiosa para aplicaciones industriales, económicas y de ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

1. De-Jesús S., Cruz-S H. “Discounted Markov Decision Processes with fuzzy costs”, Kybernetika, 2024.
2. Klir, G., “Fuzzy Sets and Fuzzy Logic”, Prentice Hall, 1995.
3. Puterman, M. L., “Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming”, Wiley, 1994.
4. M. L. Puri and D. A. Ralescu, “Fuzzy random variable”, J. Math. Anal. Appl., Vol. 114, 2, 1986, pp. 402–422.

ANÁLISIS DE LA PRECIPITAÓN EN EL CORREDOR MORELIA - PATZCUARO

Rodrigo Mancera Partida, Jorge Alejandro Ávila Olivera, Rosa Hilda Villegas Gaona, Boris Chako Tchamabe

Instituto de Investigaciones y Ciencias de la Tierra (INICIT), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)
2429593f@umich.mx

RESUMEN

El corredor Morelia-Pátzcuaro, ubicado en el estado de Michoacán (México), ha experimentado una acelerada expansión agrícola y urbana en las últimas décadas, lo que lo convierte en una zona de alto interés socioeconómico. En este trabajo se analizan los registros históricos de precipitación de las estaciones climatológicas del servicio Meteorológico Nacional (SMN) situadas en dicha área, con el fin de caracterizar su comportamiento espacio-temporal como base para futuros balances hídricos. Se recopilaron las series de precipitación de las estaciones del SMN dentro del área de estudio. Para garantizar la confiabilidad de los datos, se aplicaron pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia. Con las series que superaron estos criterios se elaboraron mapas de distribución espaciotemporal de la precipitación, los cuales permitieron analizar los patrones intra- e interanuales. El análisis evidencia un régimen pluvial marcadamente estacional, característico del clima subtropical de la región. La precipitación se concentra entre mayo y octubre (temporada de lluvias), influenciada por la circulación monzónica y la actividad ciclónica; los meses de junio, julio y agosto registran los volúmenes más intensos y frecuentes. De noviembre a abril domina la temporada seca, con valores nulos o muy bajos, consistente con el régimen de la Mesa Central de México. Se observa además una alta variabilidad interanual: años como 1941 y 1966 presentan una estación lluviosa bien definida, mientras que otros (por ejemplo, 1954 y 1978) muestran precipitaciones anuales notablemente menores.

La caracterización de la precipitación permite conocer el comportamiento de la variable clave para el balance hídrico en el corredor Morelia-Pátzcuaro. La alta concentración de lluvias en pocos meses impone desafíos y oportunidades para la gestión del agua: por un lado, requiere infraestructura de protección contra inundaciones y erosión; por otro, demanda sistemas de captación y almacenamiento que aseguren la disponibilidad del recurso durante la prolongada temporada seca.

INTRODUCCIÓN

El corredor Morelia-Pátzcuaro, en el estado de Michoacán, México, constituye una región de alta relevancia socioeconómica debido a la acelerada expansión agrícola y urbana de las últimas décadas. Esta dinámica ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, haciendo indispensable la generación de balances hídricos precisos que permitan una gestión sostenible del agua.

La precipitación es la variable de entrada fundamental en dichos balances, por lo que la calidad de sus registros históricos condiciona directamente la confiabilidad de cualquier modelo hidrológico.
Sin embargo, las series de precipitación provenientes de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) suelen presentar inhomogeneidades, valores atípicos y periodos con datos faltantes, derivados de cambios en los instrumentos, en la ubicación de las estaciones, en los procedimientos de medición o en el mismo entorno inmediato de las estaciones (urbanización, crecimiento de vegetación, etc.). Estas alteraciones pueden inducir sesgos significativos en la caracterización del régimen pluvial y por ende, en las estimaciones de la recarga hídrica.

El presente trabajo se justifica, entonces por la necesidad de someter los registros de precipitación de las estaciones del SMN ubicadas en el área de estudio a un riguroso proceso de validación estadística, que permita identificar aquellas series aptas para ser utilizadas en balances hídricos.

Solo a partir de datos confiables es posible determinar con certidumbre la estacionalidad, variabilidad interanual y distribución espacial de la lluvia, elementos clave para la planificación de infraestructura hidráulica (presas, ollas, sistemas de captación de agua pluvial) y para la prevención de riesgos y desastres por inundaciones o sequías.

TEORÍA

Las series de precipitación de las estaciones del SMN en el corredor Morelia-Pátzcuaro presentan un grado variable de homogeneidad y fiabilidad, siendo algunas de ellas aptas para su uso en balances hídricos una vez aplicados los filtros estadísticos correspondientes.

Teniendo como objetivo general evaluar la calidad de los riesgos históricos de precipitación de las estaciones del SMN en el área de estudio mediante pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia, y caracterizar el régimen pluvial espacio-temporal resultante.

Recopilando y depurando las series mensuales y anuales de precipitación de las estaciones localizadas en dicho corredor, mediante la aplicación de pruebas de rachas, de Helmert, t de Student y de Cramer para detectar las inhomogeneidades, para identificar el régimen estacional y la variabilidad interanual característica de la precipitación en la zona y así poder recomendar las estaciones más confiables para su incorporación en balances hídricos.

PARTE EXPERIMENTAL

El corredor Morelia-Pátzcuaro se localiza en el centro-norte del estado de Michoacán, dentro de la Mesa central de México. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, clasificado como C(w2) según Köppen modificado por García (1988). La precipitación media anual oscila entre 700 y 1000 mm, con una estación seca bien marcada de noviembre a abril. (Imagen 1).

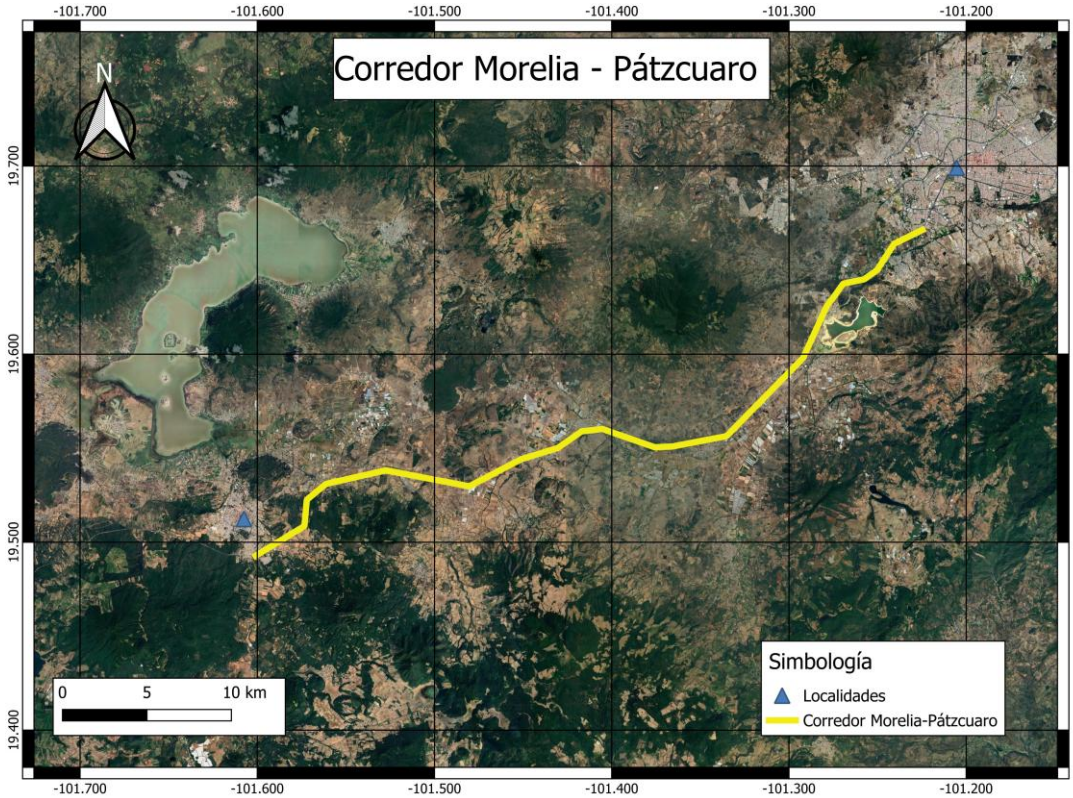


Imagen 1: Localización de área de estudio

Se realizo una recopilación de series diarias de precipitación de estaciones del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) en el corredor Morelia-Pátzcuaro, tomando como ejemplo explicativo la Estación 16022 Cointzio para observar el procedimiento de control de calidad realizado para determinar la validación de estaciones por medio de análisis estadístico de homogeneidad e independencia (prueba de Secuencias, Helmert, t de Student y Cramer).

La estación 16022 presento una precipitación total anual promedio de **821.6 mm** para el periodo 1941-2024 (71 años con datos). La mediana fue de **802.5 mm**, valor muy cercano a la media, lo que indica una distribución aproximadamente simétrica. La desviación estándar alcanzo **160.6 mm**, y el coeficiente de variación fue de **0.195** (19.5%), clasificable como variabilidad moderada según el criterio de la FAO (Food and Agriculture Organization). (Tabla 1).

Serie completa:	**1941 - 2024**	
Periodo:	83 años teóricos, 71 con datos	
n T =	**71**	
Promedio T =	821.59	
Mediana T =	**812.91**	
Desv. Est. T=	160.63	
Coef. Variación T=	20%	Variabilidad moderada-alta (clima subhúmedo)
Mínimo=	308	**año 1974**
Máximo=	1392.3	**año 1958**
Razón=	4.52	

Tabla 1: Estadísticos anuales de precipitación.

El año mas lluvioso fue **1958** con 1392.3 mm, mientras que el mas seco fue **1974** con solo 308 mm. La razón entre el máximo y el mínimo fue de 4.52, reflejando una alta variabilidad interanual.

Para la prueba de Secuencias o de rachas se calcularon los signos (+ si el valor supera la mediana, - si es inferior). Se obtuvieron **38 rachas** (secuencias consecutivas del mismo signo). El numero esperado bajo independencia para una muestra de 71 observaciones con 36 signos positivos y 35 negativos fue de aproximadamente 36.5. Dado que 38 se encuentra dentro del intervalo de aceptación [31, 42], se concluye que la serie es **independiente y homogénea**. (Tabla 2).

Secuencias	
Núm. de rachas	
u=	38
Decisión=	**HOMOGÉNEA**

Tabla 2: Prueba de Secuencias

Para la prueba t de Student se compara entre las medias de dos periodos: (Tabla 3).

- **Periodo A** (1941-1973).
- **Periodo B** (1974-2024).

t de Student		
División Propuesta		n
Periodo A	1941-1973	32
Periodo B	1974-2024	39
Periodo A	1941-1973	32
Media =	815.4	mm
Desv. Estándar =	167.8	mm
Máximo =	1392.3	(año 1958)
Mínimo =	577.2	(año 1951)
Coef. Variación =	21%	
Periodo B	1974-2024	39
Media =	826.6	mm
Desv. Estándar =	156.6	mm
Máximo =	1066.1	(año 2019)
Mínimo =	308	(año 1974)
Coef. Variación =	19%	

Tabla 3: Prueba de t de Student.

El estadístico t calculado fue de **-0.29**, con 71 grados de libertad aproximados. El valor critico no se rechaza por la nula de igualdad de medias. Por lo tanto, no existe evidencia de un cambio significativo en la precipitación media entre ambos subperiodos. (Tabla 4).

t de Student	
t=(M.A-M.B)/RAIZ((nA*DESV.E.A^2+nB*DESV.E.B^2)/(nA+nB-2))*(1/nA+1/nB)	
t= (815.4-826.6) /RAIZ ((32*167.8^2+39*156.6^2) / (32+39-2)) *(1/32+1/39)	
t=-11.2/RAIZ (901,018.88+956,418.84) /69*0.057	
t=-11.2/RAIZ (26,919.38*0.057)	
t=-11.2/RAIZ (1,534.40)	
t=-11.2/39.17	
t=-0.29	
t crítico (α=0.05, gl=73) = 1.99	
(-0.29 < 1.99)	**NO SIGNIFICATIVO**

Tabla 4: Estadístico t calculado

Para la prueba de Cramer se toma el subperiodo B (1974-2024) como periodo de prueba (n´=39 años), comprobando el estadístico (t_k) con el valor critico de 1.99 resulta no significativo. Por lo tanto, no se detecta inhomogeneidad atribuible a un cambio a la media del periodo reciente. (Tabla 5).

CRAMER		
Media T =	821.59	mm
Desv. Est. T=	160.63	mm
Media PB=	826.6	mm
n=	71	
n´=	39	
t= (Media periodo B-Media Total) /Desv. Est. Total		
t=	0.031	
t_k=0.031(Raíz ((71^2*73) / (71(71-39) +0.031^2		
t_k=0.031(Raíz (367,993/ (71*32+0.000961))		
t_k=0.031(Raíz (367,993/2,272.000961)		
t_k=0.031(Raíz 161.97)		
t_k=0.031*12.73		
t_k=0.394		
t_k= 0.394 < t crítico (α=0.05, gl=73) = 1.99		
(0.394 < 1.99)	NO SIGNIFICATIVO	

Tabla 5: Estadístico t_k calculado

RESULTADOS

El análisis evidencia un régimen pluvial marcadamente estacional, característico del clima subtropical de la región:

- Temporada seca (noviembre-abril): los valores mensuales medios son inferiores a 20 mm, con mínimos en febrero (media=7.5 mm) y marzo (7.0 mm).
- Temporada de lluvias (mayo-octubre): concentra mas del 85% de la precipitación anual. Los meses mas lluviosos **son junio, julio, agosto y septiembre**, con medias que superan los 140 mm, alcanzando un pico en julio (181.8 mm) y agosto (170.8 mm). (Imagen 2)

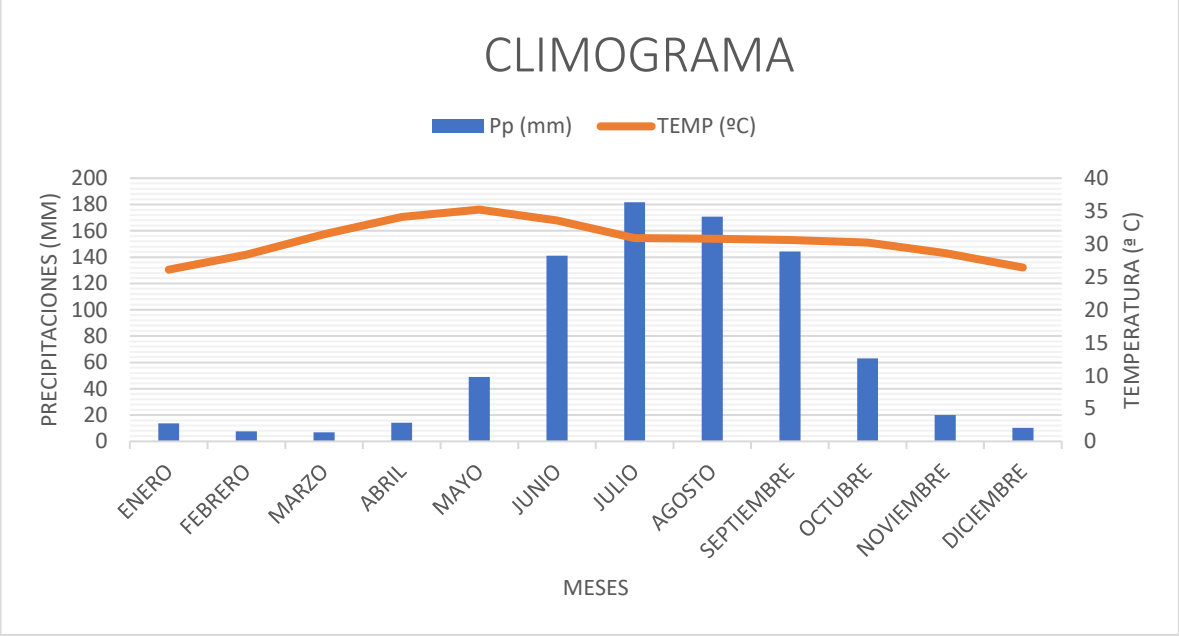


Imagen 2: Climograma del corredor Morelia-Pátzcuaro.

Para la validación de la red de estaciones en el corredor Morelia-Pátzcuaro, se analizó la base de datos de estaciones climatológicas proporcionadas por el servicio SMN para el área de estudio, la cual contiene un total de **27 estaciones** con registro de estatus verificadas. (Imagen 3). De estas, **16 estaciones** (59.3%) fueron clasificadas como **Aprobada**, mientras que **11 estaciones** (40.7%) recibiendo la clasificación **No Aprobada**. (Tabla 6).

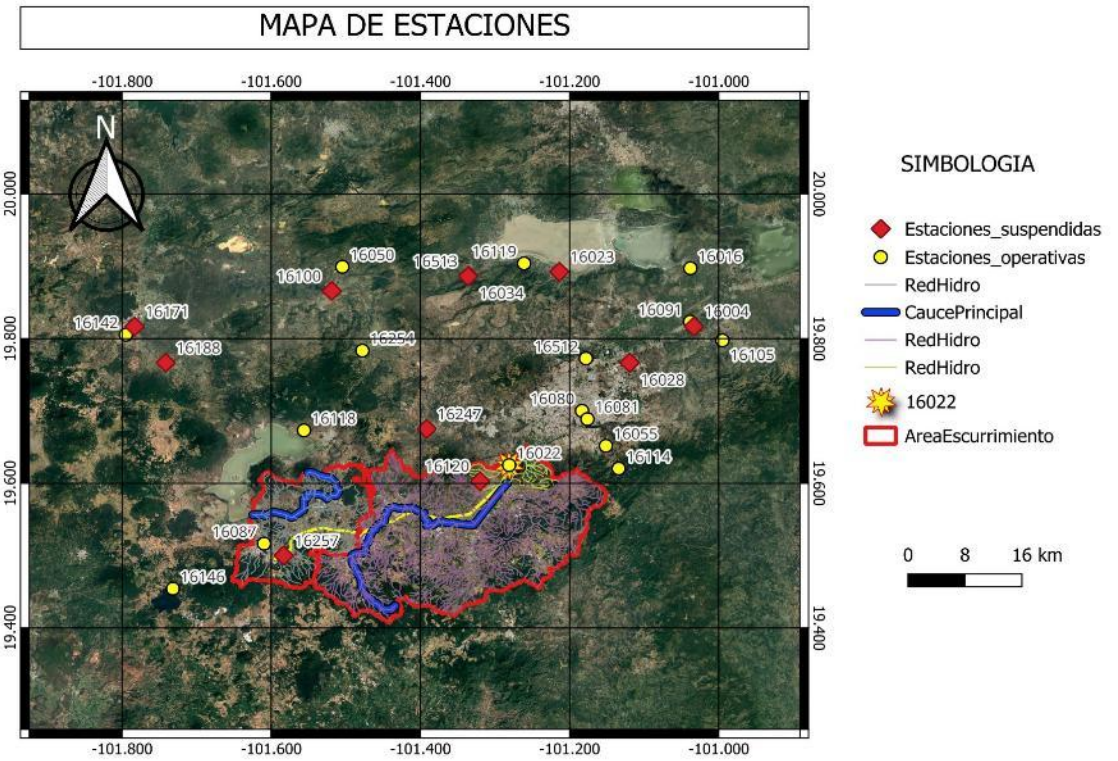


Imagen 3: Localización de las Estaciones en el área de estudio.

Estación	Estatus
16004	Aprobada
16016	Aprobada
16022	Aprobada
16023	Aprobada
16028	Aprobada
16034	Aprobada
16050	Aprobada
16055	Aprobada
16080	Aprobada
16081	Aprobada
16087	Aprobada
16091	Aprobada
16100	Aprobada
16105	Aprobada
16114	Aprobada
16118	Aprobada
16119	No Aprobada

16120	No Aprobada
16142	No Aprobada
16146	No Aprobada
16171	No Aprobada
16188	No Aprobada
16247	No Aprobada
16254	No Aprobada
16257	No Aprobada
16512	No Aprobada
16513	No Aprobada

Tabla 6: Estatus de estaciones verificadas.

El estatus **Aprobada** indica que la estación ha superado los criterios de calidad y homogeneidad establecidos, lo cual es consistente con las pruebas estadísticas de independientes aplicadas en este estudio. Por lo tanto, se considera que todas las estaciones listadas como **Aprobada** son potencialmente aptas para su uso en balances hídricos en la región (Imagen 4), siempre que se verifique la continuidad temporal de sus registros y la ausencia de periodos con datos faltantes.

Por el contrario, las estaciones con estatus No Aprobada no deben de ser utilizadas en análisis cuantitativos de precipitación sin una corrección previa o sin una justificación, ya que presentan inhomogeneidades, sesgos o fallas que comprometen la confiabilidad de sus series.

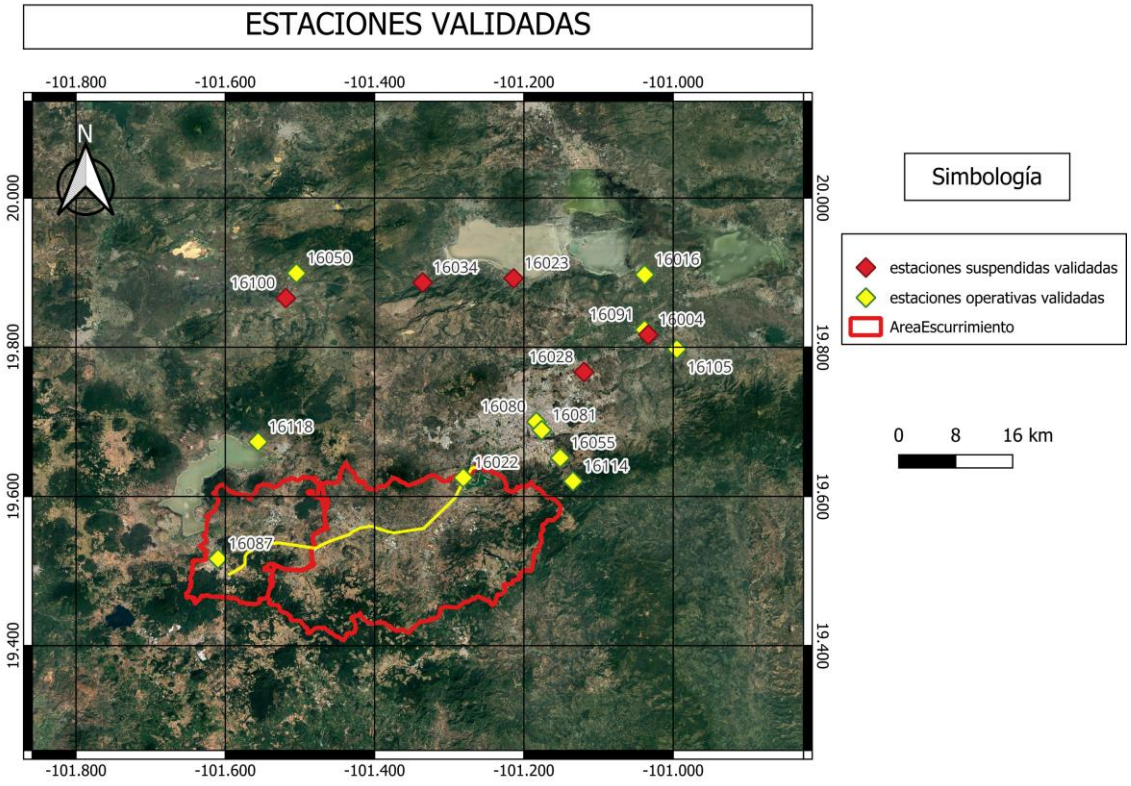


Imagen 4: Localización de estaciones validadas Aprobada.

CONCLUSIONES

La red de estaciones del SMN en el corredor Morelia-Pátzcuaro presenta una tasa de aprobación del 59% (16 de 27estaciones). Este resultado subraya la necesidad de aplicar rigurosos procesos de validación previa a cualquier estudio hidro climático, descartando aquellas series que no superan las pruebas de homogeneidad e independencia.

Las estaciones no aprobadas (11 en total) no deben ser incluidas en la construcción de series regionales de precipitación sin un proceso homogenización o ajuste estadístico, ya que podrían introducir sesgos significativos en la estimación de recarga hídrica, en la caracterización de eventos extremos y en el cálculo de un balance hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (1a. reimpresión). Editorial Limusa.
2. SMN. (2024). *Base de datos climatológica nacional.*
3. *García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM.*

ESTUDIO EN CAFÉS MEXICANOS MEDIANTE ESPECTROSCOPÍA RAMAN-SERS

Paola Daniela Guzmán Trejo*, Roberto Ysacc Sato Berrú, María Esther Mata Zamora, Elsi Violeta Mejía Uriarte, America R. Vázquez Olmos.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología ICAT, UNAM.
*316038748@quimica.unam.mx

RESUMEN

El consumo mundial de café ha oscilado alrededor de 169–177 millones de sacos de 60 kg en años recientes, alcanzando aproximadamente 174.9 millones de sacos en 2024 [1]. El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial debido a su aroma, sabor y a los efectos estimulantes de la cafeína, el principal alcaloide presente en el grano [2]. Las especies más cultivadas son Coffea arabica L. y Coffea canephora var. robusta, las cuales representan aproximadamente el 70 % y el 30 % de la producción mundial, respectivamente [3]. Tradicionalmente, la identificación y cuantificación de los compuestos presentes en el café se realiza mediante técnicas cromatográficas como HPLC o cromatografía de gases; sin embargo, estos métodos suelen ser costosos, requieren el uso de solventes orgánicos y demandan tiempos prolongados de análisis. En este contexto, la espectroscopía Raman representa una alternativa analítica rápida, eficiente y no destructiva para la identificación molecular [4,5]. Estudios previos han demostrado su utilidad para la diferenciación de genotipos de café y la clasificación de Coffea arabica, Coffea robusta y sus mezclas [6,7]. En el presente trabajo se aplicó la espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS) para el estudio comparativo y la caracterización de cafés mexicanos. Los espectros Raman se adquirieron utilizando un equipo WITec y se compararon con espectros reportados para cafeína y ácido clorogénico [8]. Los resultados obtenidos permiten inferir la presencia de cafeína y ácido clorogénico en los extractos analizados, además de aportar información sobre otros compuestos característicos del café, lo que demuestra el potencial de la técnica SERS como herramienta analítica complementaria para el estudio de matrices alimentarias complejas [9,10].

INTRODUCCIÓN

El café constituye una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial debido a su aroma, sabor y al efecto estimulante atribuido a la cafeína [2]. En 2024, el consumo global alcanzó 174.9 millones de sacos, cifra que evidencia su relevancia económica, social y agroindustrial [1]. Las especies de mayor importancia comercial son Coffea arabica y Coffea canephora (robusta), que representan aproximadamente el 70 % y 30 % de la producción mundial, respectivamente [3]. México se posiciona entre los principales productores de café, ocupando el 11.º lugar global con una producción estimada de 32,200 toneladas para el ciclo 2023/2024 [11]. Las regiones de Veracruz y Chiapas destacan por la calidad de sus cultivos de arábica, respaldados por denominaciones de origen y normativas específicas, como el “Café Veracruz” [12]. Estas zonas productoras reflejan la diversidad geográfica y sensorial del café mexicano, lo cual las convierte en un escenario idóneo para el estudio de su composición química. Tradicionalmente, la determinación de compuestos como la cafeína y el ácido clorogénico se realiza mediante técnicas cromatográficas, reconocidas por su precisión; sin embargo, debido a sus altos costos y requerimientos operativos surge el interés por métodos alternativos como la espectroscopía Raman, técnica no destructiva que permite identificar compuestos mediante vibraciones moleculares características [4,5]. Estudios previos han demostrado su eficacia en la discriminación de genotipos y en la clasificación de cafés arábica, robusta y sus mezclas [6,7].

TEORÍA

Las metodologías espectroscópicas se basan en la medición de la radiación absorbida, emitida o dispersada por especies atómicas o moleculares de interés. Estos métodos pueden clasificarse de acuerdo con la región del espectro electromagnético utilizada y el tipo de interacción que ocurre entre la radiación y la materia.

Espectroscopía UV-Vis. Es una técnica analítica aplicada para la identificación y cuantificación de compuestos químicos mediante la absorción electromagnética en las regiones ultravioleta y visible, comprendidas entre 200–400 nm y 400–800 nm, respectivamente [13]. Esta técnica se basa en la interacción de la materia con la radiación electromagnética, donde la absorción de energía provoca transiciones electrónicas desde estados fundamentales hacia estados excitados. Las principales transiciones electrónicas observadas corresponden a $\sigma\rightarrow\sigma^*$, $n\rightarrow\sigma^*$, $\pi\rightarrow\pi^*$ y $n\rightarrow\pi^*$, dependiendo de la naturaleza química del compuesto y de los grupos funcionales presentes [14]. Los compuestos que contienen enlaces dobles conjugados, anillos aromáticos o heteroátomos suelen presentar absorciones características en esta región del espectro debido a la presencia de cromóforos y auxocromos [14].

La espectroscopía UV-Vis también es ampliamente utilizada en la caracterización de nanopartículas metálicas debido al fenómeno conocido como resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR). Este fenómeno ocurre cuando los electrones libres presentes en la superficie de nanopartículas metálicas oscilan colectivamente al interactuar con la radiación electromagnética incidente, produciendo bandas de absorción características [15]. La posición, intensidad y forma de la banda plasmónica dependen del tamaño, morfología, concentración y grado de agregación de las nanopartículas, así como del medio dieléctrico circundante. En el caso de nanopartículas de plata, la señal plasmónica suele observarse entre 400–450 nm [15].

Espectroscopía Raman–SERS. La espectroscopía Raman es una técnica vibracional no destructiva basada en la dispersión inelástica de la luz cuando interactúa con la materia. Fue descubierta por Chandrasekhara Venkata Raman en 1928 y constituye una herramienta analítica fundamental para la identificación y caracterización molecular [5]. A diferencia de las técnicas de absorción molecular, la espectroscopía Raman proporciona información estructural a partir de los cambios en la polarizabilidad de las moléculas durante su interacción con la radiación electromagnética [5].

La espectroscopía Raman presenta ventajas analíticas como la mínima preparación de muestra, el análisis no destructivo, la posibilidad de trabajar en medios acuosos y la obtención de información molecular específica. Debido a estas características, ha sido ampliamente empleada en química analítica, nanotecnología, farmacología, ciencia de materiales y ciencia de alimentos para la identificación de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como para el estudio de biomoléculas y metabolitos [4]. Sin embargo, una de sus principales limitaciones es la baja intensidad de la señal Raman, ya que únicamente una pequeña fracción de los fotones incidentes experimenta dispersión inelástica. Además, en moléculas orgánicas puede presentarse fluorescencia intensa, la cual enmascara parcial o totalmente las bandas Raman de interés.

Como alternativa para superar estas limitaciones se desarrolló la técnica SERS (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy). Esta metodología amplifica significativamente la señal Raman de moléculas adsorbidas sobre superficies nanoestructuradas metálicas. Cuando los analitos se encuentran próximos a nanopartículas de plata u oro, la resonancia plasmónica superficial localizada produce una intensificación del campo electromagnético local, incrementando considerablemente la intensidad de la señal Raman [9]. Simultáneamente, la proximidad entre la molécula y la superficie metálica puede favorecer procesos de transferencia de energía no radiativa que disminuyen la fluorescencia, fenómeno conocido como quenching [9]. Gracias a ello, la técnica SERS ha sido ampliamente empleada para la detección de cafeína, compuestos fenólicos, antioxidantes y otros metabolitos presentes en matrices alimentarias complejas [10].

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

- Viales de vidrio de 25 y 5 mL
- Celdas de cuarzo 5 mL
- Micropipeta de 1mL- 100µL
- Micropipeta de 10 µL-0.5 µL
- Puntas de micropipetas
- Papel aluminio
- Portaobjetos de vidrio
- Prensa francesa

Reactivos:

- Agua molecular (Sigma Aldrich)
- Nitrato de plata (Sigma Aldrich Lot#MKCX2725)
- Estándar de cafeína (Sigma Aldrich Lot#MKBQ2780V)
- estándar de ácido clorogénico
- Muestras de café comercial mexicano
- Café molido de Veracruz de la zona de Coatepec, tostado medio, molienda media.
- Café molido de Chiapas de la zona de Jaltenango, tostado medio, molienda media.

Equipos:

- Espectrómetro Cary Series UV-Vis-NIR Spectrophotometer
- UV-VIS, Ocean Optics HR4000
- Raman Witec con láser de 532 nm
- Ultracentrífuga Z36HK
- Balanza analítica
- Parrilla de calentamiento

Extracción de Café

-Catación y 24 h

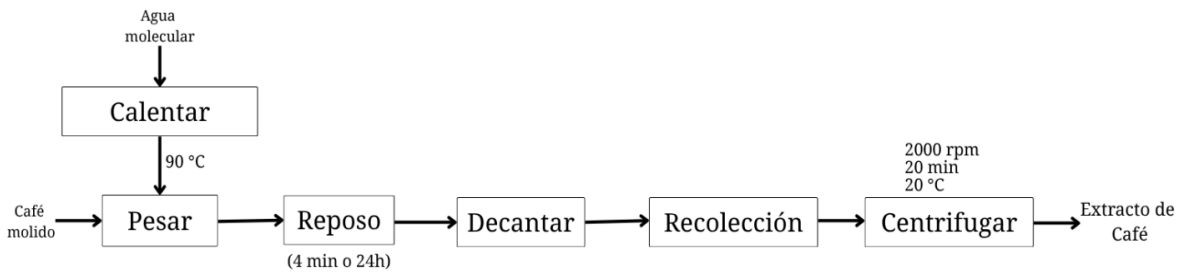


Imagen 1. Diagrama de flujo del método de extracción de café por catación, basado en la norma ISO 6668:2008, y del método de reposo durante 24 h.

-Prensa francesa

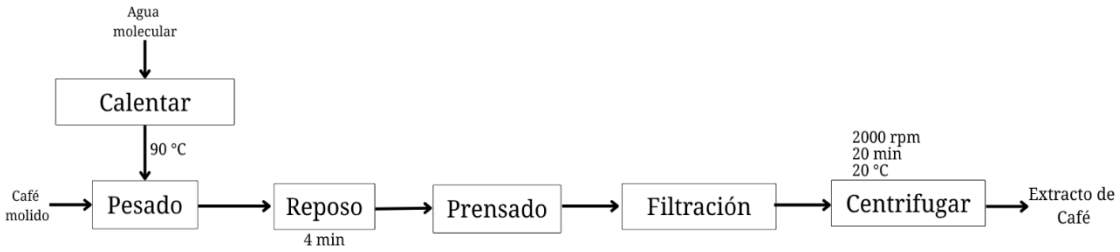


Imagen 2. Diagrama de flujo del método de extracción de café mediante la metodología de prensa francesa.

Síntesis de nanopartículas

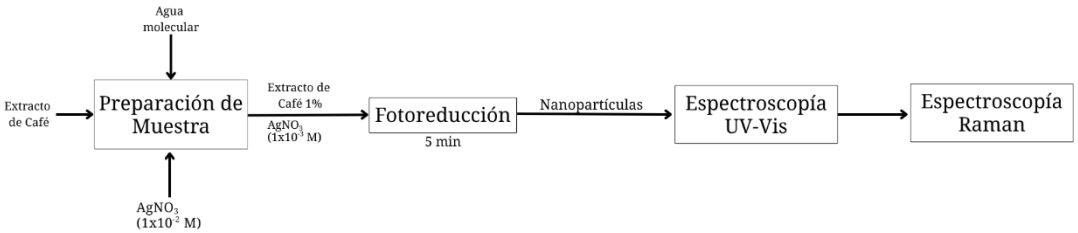
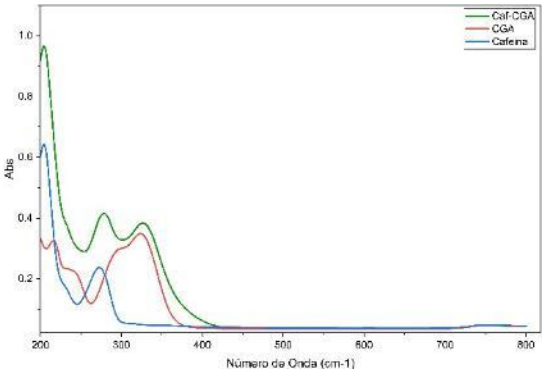


Imagen 3. Diagrama de flujo de la síntesis de nanopartículas de plata a partir de los extractos de café y la obtención de espectros UV-Vis y SERS.

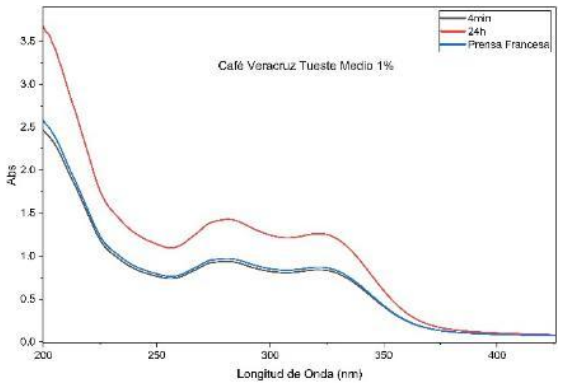
RESULTADOS

Espectros UV-Vis:

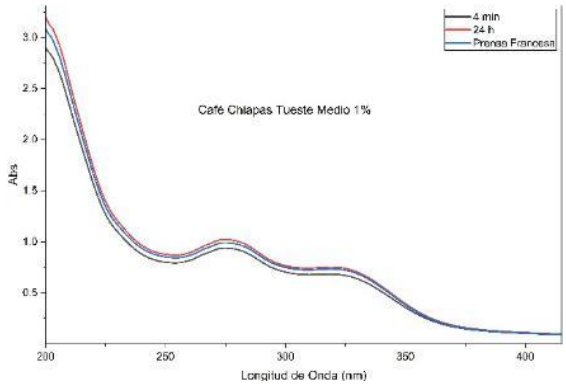


Gráfica 1. Espectros UV-Vis del estándar de cafeína y de ácido clorogénico con concentración de 4pm, y mezcla de ambos estándares a 5 ppm.

Con el objetivo de identificar los compuestos responsables de las señales observadas en los extractos de café, se obtuvieron los espectros UV-Vis de cafeína, ácido clorogénico (CGA) y una mezcla de ambos compuestos. Posteriormente, estos espectros de referencia se compararon con los obtenidos para los extractos de café, con la finalidad de evaluar la presencia de bandas de absorción características asociadas a dichos metabolitos. Este análisis permitió realizar una identificación preliminar de los compuestos que contribuyen a los perfiles espectrales observados en los extractos estudiados.



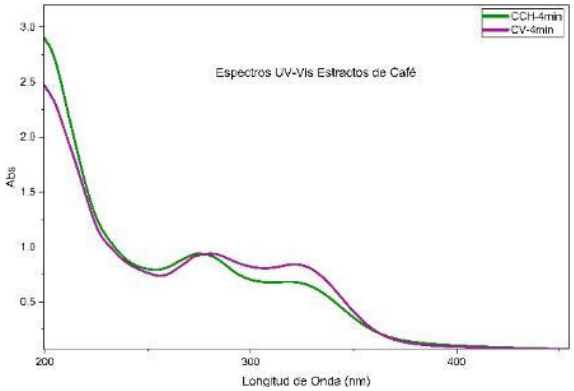
Gráficas 2. Extractos de café de Veracruz tueste medio por los tres métodos de extracción al 1%.



Gráficas 3. Extractos de café de Chiapas tueste medio por los tres métodos de extracción al 1%.

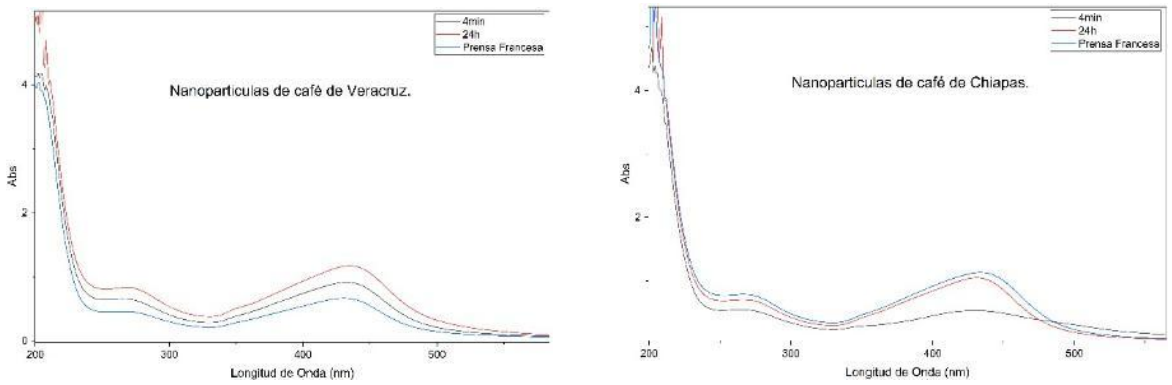
Las gráficas 2 y 3 corresponden a diluciones al 1 % de los extractos obtenidos a partir de cafés de Veracruz y Chiapas. En ambos casos se observa una tendencia similar en la intensidad de absorción en función del método de extracción empleado. Los extractos obtenidos mediante el método de catación (4 min) presentaron las menores intensidades de absorción, seguidos por los obtenidos mediante prensa francesa, mientras que los extractos sometidos a un periodo de reposo de 24 h mostraron las mayores intensidades de absorción. Este comportamiento sugiere una mayor extracción de compuestos absorbentes conforme aumenta el tiempo de contacto entre el café y el solvente (en este caso agua).

Asimismo, destaca que el extracto de café Veracruz sometido a reposo durante 24 h presentó una intensidad de absorción considerablemente mayor que la observada para el extracto de café Chiapas bajo las mismas condiciones. Este resultado sugiere una mayor concentración de compuestos absorbentes en el extracto de Veracruz, lo que podría estar relacionado con diferencias en el origen geográfico, las condiciones de cultivo, el procesamiento del grano o la eficiencia de extracción de los compuestos presentes en cada muestra.



Gráfica 4. Extracto de café de Veracruz vs extracto de café de Chiapas por el método de catación (4 min).

En la gráfica 4, podemos comparar los perfiles espectrales de los cafés de Veracruz y Chiapas, se observan diferencias tanto en la intensidad como en la forma de algunas bandas de absorción. Estas variaciones podrían estar asociadas a diferencias en la composición química y en la concentración relativa de los compuestos presentes en cada muestra, tales como cafeína, ácidos clorogénicos y otros metabolitos característicos del café.



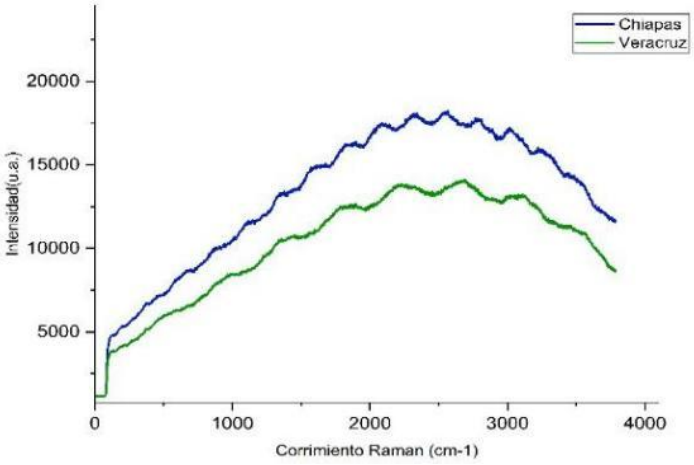
Gráfica 5 y 6. Señal plasmónica de nanopartículas de plata generadas a partir de extractos de café de Veracruz y Chiapas.

En las gráficas 5 y 6 se observa la banda de resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR) correspondiente a las nanopartículas de plata sintetizadas utilizando los extractos de café. En ambos casos, la banda plasmónica se localiza aproximadamente entre 430 y 440 nm, intervalo que, de acuerdo con la literatura, es característico de nanopartículas de plata predominantemente esféricas y de tamaño nanométrico (Kelly et al., 2003; Amendola & Meneghetti, 2009).

Asimismo, la intensidad de la banda plasmónica sigue una tendencia similar a la observada en los extractos de café utilizados para la síntesis. Las nanopartículas obtenidas a partir de los extractos preparados mediante catación (4 min) presentan las menores intensidades de absorción, seguidas por aquellas obtenidas mediante prensa francesa, mientras que las sintetizadas utilizando extractos sometidos a reposo durante 24 h muestran las mayores intensidades. Este comportamiento sugiere una mayor formación o concentración de nanopartículas asociada a una mayor disponibilidad de compuestos reductores presentes en los extractos.

Por otra parte, en las nanopartículas sintetizadas a partir del café de Chiapas se observa que la banda plasmónica correspondiente al extracto obtenido mediante catación presenta un ensanchamiento acompañado de una disminución en la intensidad de absorción. Este fenómeno puede estar relacionado con procesos de agregación o aglomeración de las nanopartículas, los cuales generan una distribución de tamaños más amplia y modifican las propiedades ópticas del sistema. El ensanchamiento de la banda plasmónica ha sido reportado en la literatura como un indicador de interacciones entre nanopartículas y de una menor estabilidad coloidal de la suspensión (Kelly et al., 2003).

Espectros SERS



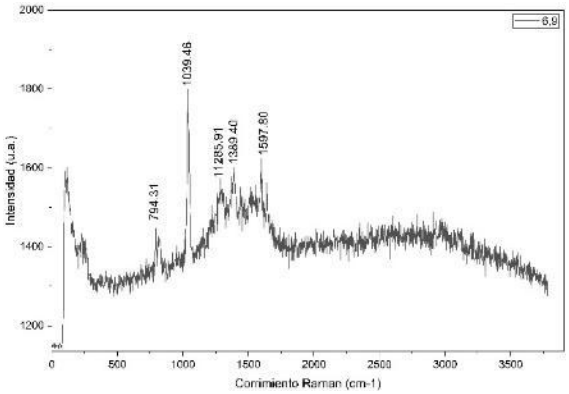
Grafica 7: Espectro Raman de extractos al 1% de café sin nanopartículas.

En la gráfica 7 se presentan los espectros Raman obtenidos para los extractos de café utilizando una longitud de onda de excitación de 532 nm. Se observa que, incluso a bajas concentraciones, los espectros están dominados por una intensa señal de fluorescencia, la cual genera un fondo elevado que enmascara las bandas Raman características de los compuestos presentes en las muestras. Este comportamiento es común en matrices complejas de origen vegetal, como los extractos de café, debido a la presencia de compuestos fenólicos, melanoidinas, ácidos clorogénicos y otros metabolitos con sistemas electrónicos conjugados capaces de emitir fluorescencia al ser excitados por el láser. Como consecuencia, la elevada intensidad del fondo fluorescente disminuye significativamente la relación señal-ruido, dificultando o incluso impidiendo la identificación de los modos vibracionales característicos de las moléculas presentes en la muestra.

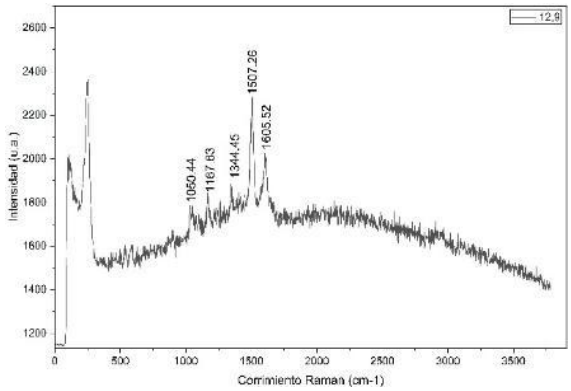
Los siguientes espectros corresponden a los análisis SERS obtenidos a partir de las nanopartículas de plata sintetizadas utilizando los extractos de café como agentes reductores y estabilizantes. A diferencia de los espectros Raman convencionales, en los que la intensa fluorescencia de la matriz dificulta la observación de señales vibracionales definidas, la presencia de las nanopartículas de plata permitió disminuir significativamente el fondo fluorescente y amplificar la señal Raman.

Espectros SERS Café Chiapas Tueste Medio

Las bandas observadas en la gráfica 8, en 789, 1039, 1286, 1339 y 1498 cm^{-1} son consistentes con señales reportadas en la literatura para cafeína y ácidos clorogénicos, dos de los principales compuestos bioactivos presentes en el café. La banda alrededor de 789 cm^{-1} se asocia principalmente con vibraciones características de la estructura de la cafeína, siendo una de las señales más utilizadas para su identificación mediante espectroscopía Raman y SERS. La señal observada en 1039 cm^{-1} puede relacionarse con vibraciones de anillos aromáticos presentes en los ácidos clorogénicos. Por otra parte, las bandas localizadas en 1286 y 1339 cm^{-1} se atribuyen principalmente a vibraciones de enlaces C–N y grupos metilo característicos de la cafeína. Finalmente, la banda observada en 1498 cm^{-1} corresponde a vibraciones de enlaces C=C en sistemas aromáticos conjugados, asociadas a la presencia de ácidos clorogénicos



Grafica 8. Espectro SERS de extracto de 4 min

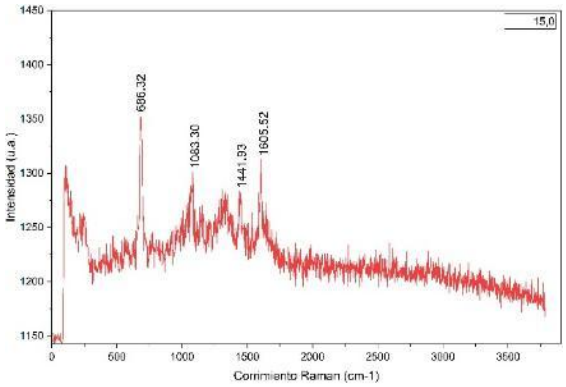


Gráfica 9. Espectro SERS del extracto de 24h

En la gráfica 9, las bandas ubicadas en 1050 y 1234 cm^{-1} pueden relacionarse con vibraciones de enlaces C–O y grupos funcionales presentes en la estructura de los ácidos clorogénicos, mientras que las señales observadas en 1507 y 1605 cm^{-1} corresponden a vibraciones de enlaces C=C de sistemas aromáticos conjugados característicos de estos compuestos.

En la gráfica 10, podemos observar una banda observada alrededor de 683 cm^{-1} puede asociarse a vibraciones características de la estructura de la cafeína, mientras que la señal en 1083 cm^{-1} se relaciona con vibraciones de grupos funcionales presentes tanto en la cafeína como en los ácidos clorogénicos. Por otra parte, las bandas localizadas en 1414 y 1605 cm^{-1} corresponden a vibraciones de enlaces C=C en sistemas aromáticos conjugados, características de los ácidos clorogénicos y otros compuestos fenólicos derivados del ácido cafeico.

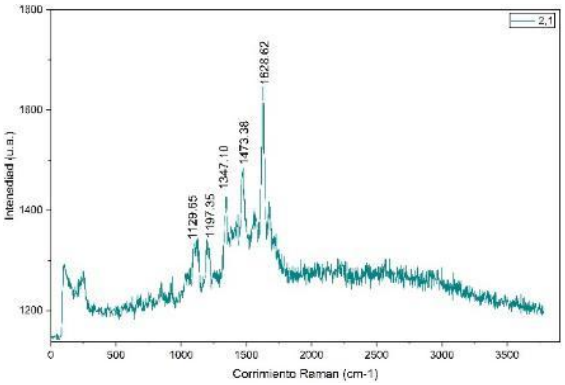
Aunque existen diferencias en la intensidad relativa y posición de algunas señales, todos los espectros presentan bandas en regiones reportadas para estos compuestos, lo que sugiere que ambos metabolitos estuvieron presentes independientemente del método de extracción empleado. Las señales atribuidas a la cafeína se observan principalmente en la región de 680–800 cm^{-1} y entre 1200–1400 cm^{-1}, mientras que las bandas asociadas a los ácidos clorogénicos se localizan principalmente entre 1000–1700 cm^{-1}, destacando aquellas relacionadas con sistemas aromáticos conjugados.



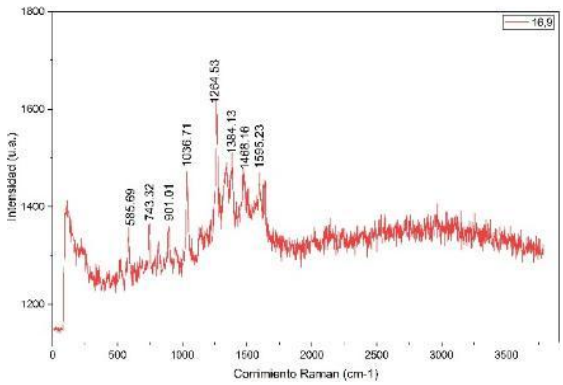
Gráfica 10. Espectro SERS del extracto de prensa francesa.

Espectros SERS Café Veracruz Tueste Medio

En la gráfica 11, podemos observar una banda observada alrededor de 1293 cm^{-1} puede atribuirse a vibraciones asociadas a enlaces C–N y grupos metilo característicos de la cafeína. Por su parte, las señales registradas en 1379, 1448 y 1470 cm^{-1} se encuentran en regiones asociadas tanto a vibraciones de la estructura de la cafeína como a grupos funcionales presentes en los ácidos clorogénicos. La banda más intensa, localizada en 1628 cm^{-1}, corresponde a vibraciones de estiramiento de enlaces C=C en sistemas aromáticos conjugados, característica ampliamente reportada para compuestos fenólicos derivados del ácido cafeico y los ácidos clorogénicos.



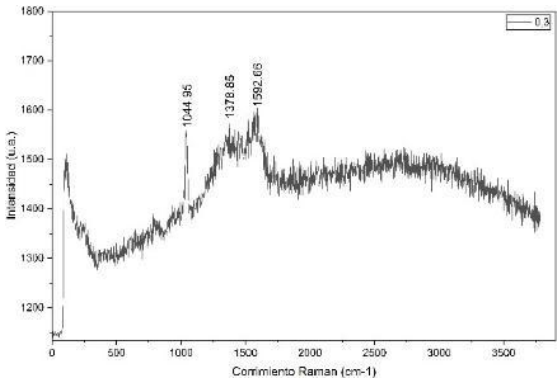
Grafica 11. Espectro SERS de extracto de 4 min



Grafica 12. Espectro SERS de extracto de 24 h

En la gráfica 12, podemos observar una señal alrededor de 743 cm^{-1} puede asociarse a vibraciones del sistema heterocíclico de la cafeína, considerada una de las bandas más representativas de este compuesto en espectros Raman-SERS. Por otro lado, la banda ubicada en 1087 cm^{-1} se relaciona con vibraciones de enlaces C–N y C–O presentes tanto en la cafeína como en compuestos fenólicos. En la región comprendida entre 1264 y 1459 cm^{-1} se observaron señales asociadas a deformaciones de grupos metilo y vibraciones del sistema aromático conjugado, atribuidas principalmente a la presencia de cafeína y ácidos clorogénicos. Finalmente, la banda más intensa, localizada alrededor de 1585 cm^{-1}, corresponde al estiramiento de enlaces C=C en estructuras aromáticas conjugadas,

característica típica de compuestos fenólicos derivados del ácido cafeico y de los ácidos clorogénicos.



Grafica 13. Espectro SERS de extracto de 4 min

En el espectro de la gráfica 13, la banda observada alrededor de 1045 cm^{-1} puede atribuirse a vibraciones de estiramiento C–O y C–N asociadas a compuestos fenólicos y alcaloides presentes en la muestra. Asimismo, las señales registradas en 1378 y 1526 cm^{-1} corresponden a vibraciones relacionadas con deformaciones de grupos metilo y estiramientos del sistema aromático conjugado, características reportadas para la cafeína y los ácidos clorogénicos. En particular, la banda localizada en 1526 cm^{-1} sugiere la presencia de estructuras aromáticas derivadas del ácido cafeico, debido a las vibraciones de enlaces C=C conjugados observadas comúnmente en compuestos fenólicos del café.

Las señales asociadas a la cafeína se identificaron principalmente en las regiones de 700–800 cm^{-1} y 1200–1400 cm^{-1}, relacionadas con vibraciones del sistema purínico y deformaciones de grupos metilo. Por otro lado, las bandas atribuidas a los ácidos clorogénicos se localizaron principalmente entre 1000–1700 cm^{-1}, destacando aquellas correspondientes a vibraciones de enlaces C=C en sistemas aromáticos conjugados derivados del ácido cafeico.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos representan un primer acercamiento hacia la identificación de compuestos bioactivos presentes en una matriz compleja como el café mediante espectroscopía Raman/SERS y UV-Vis. Aunque las bandas observadas se localizaron en regiones reportadas para cafeína y ácidos clorogénicos, no es posible confirmar de manera concluyente la presencia específica de estos compuestos únicamente a partir de los espectros obtenidos, debido a la superposición de señales y a la complejidad química característica del café. Sin embargo, las similitudes observadas con espectros reportados en la literatura sugieren la posible presencia de compuestos pertenecientes a estas familias químicas.

La síntesis verde de nanopartículas de plata favoreció la disminución de la fluorescencia de las muestras, permitiendo obtener espectros Raman con mejor definición e intensidad de señal. El efecto de realce superficial generado por las nanopartículas facilitó la observación de bandas asociadas a compuestos fenólicos y alcaloides presentes en los extractos de café, evidenciando el potencial de esta estrategia para el análisis de matrices complejas.

Asimismo, los espectros UV-Vis permitieron observar diferencias relacionadas tanto con el método de extracción como con la región de procedencia del café, particularmente entre las muestras de Chiapas y Veracruz. Estas variaciones sugieren cambios en la composición química y en la concentración relativa de compuestos presentes en los extractos, lo que demuestra la sensibilidad de las técnicas espectroscópicas para detectar diferencias composicionales asociadas al origen y procesamiento del café.

AGRADECIMIENTOS: Al Laboratorio de Caracterización Espectroscópica (LUCE) del ICAT-UANAM por las facilidades de uso de los equipos espectroscópicos. Al programa *PAPIIT IN110224* por el apoyo económico durante la realización de dicho trabajo

BIBLIOGRAFÍA

1. International Coffee Organization (ICO). (2024). Coffee Market Report 2024. https://www.ico.org/
2. Farah, A. (2012). Coffee constituents. En Y.-F. Chu (Ed.), Coffee: Emerging health effects and disease prevention (pp. 21–58). Wiley-Blackwell.
3. Amorim, L., Martins, D., & Almeida, P. (2024). Global coffee species and their impact on sensory quality. Journal of Food Science and Technology, 61(2), 152–160. https://doi.org/10.1007/s11947-024-03539-1
4. Long, D. A. (2002). The Raman effect: A unified treatment of the theory of Raman scattering by molecules. Wiley.
5. Smith, E., & Dent, G. (2019). Modern Raman spectroscopy: A practical approach. Wiley.
6. Craig, A. P., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2019). Raman spectroscopy for differentiation of coffee genotypes. Food Chemistry, 288, 262–267.
7. Keidel, A., et al. (2010). Discrimination of arabica and robusta coffee beans by Raman spectroscopy. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(21), 11187–11192.
8. Herdt, D., et al. (2024). Quantitative analysis of chlorogenic acid during coffee roasting via Raman spectroscopy. Chemosensors, 12(6), 106.
9. Le Ru, E. C., & Etchegoin, P. G. (2009). Principles of SERS and plasmonic effects. Elsevier.
10. Sharma, B., et al. (2012). SERS: Materials, applications, and future. Materials Today, 15(1–2), 16–25.
11. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Panorama agroalimentario del café en México.
12. Secretaría de Economía. (2000). Declaración de protección de la denominación de origen “Café Veracruz”. DOF.
13. Skoog, D. A., et al. (2018). Principles of instrumental analysis. Cengage.
14. Silverstein, R. M., et al. (2014). Spectrometric identification of organic compounds. Wiley.
15. Amendola, V., & Meneghetti, M. (2009). UV–Vis spectroscopy of nanoparticles. J. Phys. Chem. C, 113, 4277–4285.
16. Guo, Y., et al. (2020). UV–Vis for nanoparticle characterization. Applied Sciences, 10, 6874.

ESTUDIO IN SILICO DEL C_{60} FUNCIONALIZADO CON C_{60} $(Arg)_8$ Y $C_{60}(Gly)_4$: PROPIEDADES RELACIONADAS CON LA ESTRUCTURA ELECTRÓNICA

Estefanía Espinoza Carmona, Zuriel Natanael Cisneros García, Carlos Iván Méndez Barrientos

Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara.
estefania.espinoza4498@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Las nanoestructuras de carbono, particularmente los fullerenos, poseen propiedades fisicoquímicas únicas derivadas de su geometría y la disposición de sus dobles enlaces conjugados, lo que les confiere un alto potencial en aplicaciones biomédicas y nanotecnológicas. Un área de creciente interés es la funcionalización exoédrica del C_{60} con aminoácidos para mejorar su biocompatibilidad y actividad antioxidante. En este trabajo, se realizó un estudio teórico basado en la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) para caracterizar los sistemas $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$. Las optimizaciones geométricas se llevaron a cabo utilizando el funcional B3LYP y el conjunto de bases 6-311G(d,p). Se evaluó la reactividad local mediante descriptores de la función de Fukui $\boldsymbol{f}^{+}(\vec{\boldsymbol{r}})$ para identificar los sitios de adición preferentes, y se calcularon descriptores globales como el potencial de ionización (*PI*) y la afinidad electrónica (*AE*) para determinar la capacidad electrodonadora y electroaceptora de los aductos. Estos hallazgos proporcionan criterios fisicoquímicos fundamentales para el diseño de nuevas plataformas de C_{60} con potencial como agentes fotoprotectores y radioprotectores.

INTRODUCCIÓN

Los fullerenos, al igual que el diamante, el grafito, el grafeno o los nanotubos de carbono, son una forma alotrópica del carbono. Su descubrimiento se remonta a 1985, cuando en la Universidad Rice en Houston, Texas, Harold Kroto y su grupo de trabajo propusieron un experimento para estudiar la nucleación del carbono es estrellas gigantes rojas, sorpresivamente, el resultado de este experimento fue una estructura formada únicamente por 60 átomos de carbono que debía tener una geometría de un icosaedro truncado. Compuesto que fue llamado fullereno en honor al arquitecto estadounidense Richad Bukmisnter Fuller, debido a la similitud estructural con sus famosas cúpulas geodésicas [1]. Experimentalmente se han detectado fullerenos desde el C_{20}, considerado el fullereno de jaula cerrada más pequeño, hasta fullerenos gigantes como el C_{500} o mayores en estudios de espectrometría de masas y microscopía [2,3]. No obstante, la enorme familia de compuestos que comprenden los fullerenos, en cualquier producción la estructura más abundante es el C_{60}, misma que ha sido bien identificada como es una nanoestructura molecular formada por 60 átomos de carbono dispuestos en una jaula cerrada de alta simetría, compuesta por 12 pentágonos y 20 hexágonos [1]. Presenta una red π conjugada, elevada estabilidad estructural, carácter aceptor de electrones y una reactividad química que permite su funcionalización. Es considerado un material unidimensional, catalogado como una esponja de radicales al poder captar hasta 34 radicales metilo sin comprometer su estructura [4].

Aun cuando las propiedades del C_{60} prístino son extraordinarias y desde su descubrimiento han despertado interés en áreas como materiales avanzados, catálisis, biomedicina y sistemas fotodinámico, una de sus principales limitaciones es su nula solubilidad en agua u otros solventes polares. Para superar esta barrera en su aplicación, diversos trabajos de investigación se han centrado en la funcionalización de la jaula de carbonos con grupos que le confieran polaridad u otras propiedades de interés, al respecto se puede destacar la funcionalización con grupos alcohol, carboxilos o aminas, que además de lograr la completa solubilidad ofrecen, se han encontrado que poseen propiedades neuroprotectoras por la captación de especies reactivas de oxígeno, antivirales por inhibición de proteínas virales importantes para su replicación y antibacterianas por diferentes mecanismos como la desestabilización de la membrana, potenciación de antibióticos convencionales

o incluso por daño o estrés oxidativo [5,6,7]. En este mismo sentido, se ha reportado la funcionalización o agentes de mayor tamaño como el polietilenglicol que aumenta la solubilidad, reduce la agregación y puede disminuir el reconocimiento por el sistema inmune, lo que supondría aplicaciones en liberación de fármacos, terapia fotodinámica, diagnóstico por imagen entre otras; funcionalización con polisacáridos que mejora el reconocimiento celular de los receptores de carbohidratos y podría suponer mecanismos de transporte en medios biológicos y mejora de biocompatibilidad; asimismo, la funcionalización algunos péptidos ha demostrado mejor direccionamiento a células o tejidos específicos para el transporte de fármacos [8,9,10].

Recientemente, Sharoyko *et al.* reportaron la síntesis y caracterización de una familia de derivados hidrosolubles de C_{60} funcionalizados con aminoácidos. Entre estos sistemas destaca el aducto formulado como $C_{60}(Gly)_4$, correspondiente a un fullereno C_{60} funcionalizado con cuatro residuos de glicina. La formación del tetraaducto fue sustentada mediante análisis elemental, RMN de ^{13}C en estado sólido, FT-IR, análisis termogravimétrico y HPLC, con una pureza reportada de 99.8%. En este estudio también se evaluaron sus propiedades fisicoquímicas en solución acuosa, su comportamiento asociativo, su interacción con albúmina sérica humana, su hemocompatibilidad, su actividad antirradical y su posible efecto protector frente a la glicación de HSA y la fotodegradación de colágeno. Los autores concluyen que la funcionalización del C_{60} con glicina permite obtener un nanomaterial hidrosoluble, hemocompatible, no citotóxico ni genotóxico en el intervalo evaluado, con actividad antioxidante y potencial aplicación como material biomédico [11].

En un trabajo posterior, Sharoyko *et al.* estudiaron el aducto hidrosoluble formulado como $C_{60}(Arg)_8$, constituido por un núcleo de C_{60} funcionalizado con ocho residuos de L-arginina. La composición y estructura del derivado fueron respaldadas mediante análisis elemental, RMN de ^{13}C en estado sólido, FT-IR, espectroscopía UV-Vis, HPLC y análisis termogravimétrico. Además, se evaluaron sus propiedades fisicoquímicas en solución, incluyendo el coeficiente de partición octanol/agua, distribución de tamaños de agregados, potencial ζ y asociación molecular mediante dinámica molecular. Los autores reportaron que $C_{60}(Arg)_8$ presenta carácter anfifílico, forma agregados estables en medios acuosos y salinos, y exhibe propiedades protectoras relevantes, incluyendo actividad radioprotectora, antiglicante y fotoprotectora frente a daño inducido por radiación UV en colágeno. Adicionalmente, al incorporarse en películas de colágeno, el $C_{60}(Arg)_8$ mejoró las propiedades mecánicas, la adhesión celular y la proliferación de células HEK293, lo que sugiere su potencial uso en biomateriales, medicina regenerativa e ingeniería de tejidos [12].

Aunque los trabajos de Sharoyko et al. confirman experimentalmente la formación de los aductos $C_{60}(Gly)_4$ y $C_{60}(Arg)_8$ mediante técnicas espectroscópicas y fisicoquímicas, la descripción estructural a nivel molecular no se aborda de manera exhaustiva. En particular, para $C_{60}(Gly)_4$ se reportan cálculos DFT para obtener geometría y cargas, junto con una simulación de dinámica molecular de una molécula en agua, mientras que para $C_{60}(Arg)_8$ se emplean cálculos DFT y dinámica molecular principalmente para estudiar su asociación en agua y solución salina. Sin embargo, estos estudios no parecen explorar de forma sistemática la diversidad de isómeros posibles, los sitios preferentes de adición, la estabilidad relativa de distintas configuraciones ni la relación entre estructura final, distribución de carga y propiedades biológicas. Por ello, un estudio computacional detallado resulta necesario para proponer con mayor fundamento la estructura molecular más probable de estos derivados, discriminar entre posibles arreglos regioisoméricos y comprender cómo la posición y orientación de los aminoácidos sobre el núcleo fullerénico modulan propiedades como solubilidad, agregación, interacción con biomoléculas, actividad antioxidante y afinidad por medios acuosos o lipídicos.

La propuesta del presente trabajo consiste en identificar la estructura más probable de los aductos $C_{60}(Gly)_4$ y $C_{60}(Arg)_8$ mediante una estrategia computacional basada en la adición gradual de residuos de glicina y arginina sobre la jaula de C_{60}. Para ello, se empleará la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) como herramienta para evaluar la estabilidad relativa de los isómeros generados en cada etapa de funcionalización. La función de Fukui $f^+(\vec{r})$ se utilizará como criterio de reactividad local para orientar la selección de los sitios preferenciales de adición nucleofílica, permitiendo reducir el número de configuraciones posibles y dirigir la búsqueda hacia los arreglos regioisoméricos más

viables. Una vez obtenidas las estructuras finales más probables para $C_{60}(Gly)_4$ y $C_{60}(Arg)_8$, se estimarán descriptores globales de reactividad, particularmente el potencial de ionización (PI) y la afinidad electrónica (AE), con el fin de analizar su estabilidad electrónica y su capacidad de transferencia de carga. En conjunto, esta aproximación permitirá establecer una relación entre regioquímica, estabilidad molecular y reactividad electrónica, aportando criterios fisicoquímicos para comprender mejor las propiedades de estos aductos y su posible aplicación como plataformas fullerénicas con potencial fotoprotector, radioprotector y como sistemas de administración de fármacos.

MÉTODO DE CÁLCULO

Todas las estructuras moleculares fueron modeladas a través del visualizador y editor molecular Gauss View 6. La optimización de las estructuras se llevó a cabo sin ninguna restricción empleando el funcional intercambio y correlación B3LYP y el conjunto base 6-311G(d,p); tal como están implementados en el software de científico Gaussian 16 [13]. Adicionalmente, para corroborar que las estructuras encontradas corresponden con mínimos locales en la superficie de energía potencial, al mismo nivel de teoría se realizó un análisis de modos normales de vibración inspeccionando que no se encontraran frecuencias imaginarias.

Para estudiar la adición de aminoácidos se usó como guía el índice de reactividad local de la función de Fukui para adiciones nucleofílicas ($\boldsymbol{f^+(\vec{r})}$), esta se calculó mediante la aproximación de las diferencias finitas (ecuación 1) [14].

$$\boldsymbol{f^+(\vec{r}) = \rho_{neutro}(\vec{r}) - \rho_{catión}(\vec{r}).} \qquad \text{(ecuación 1)}$$

A partir de aquellos átomos en los que se encuentra presente la isosuperficie correspondiente a la $\boldsymbol{f^+(\vec{r})}$ se adicionó el nuevo aminoácido y se llevo a cabo la optimización de la geometría y análisis de los modos normales de vibración. Este proceso se repitió hasta llegar al número a las estructuras más favorables de $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$.

El cálculo del potencial de ionización *(PI)* y afinidad electrónica *(AE)* se realizó mediante la diferencia vertical de energía con los estados ionizados, tal como se expresa en las ecuaciones 2 y 3 [15].

$$\boldsymbol{IP = E_{catión} - E_{neutro}} \qquad \text{(ecuación 2)}$$

$$\boldsymbol{AE = E_{nuetro} - E_{anión}.} \qquad \text{(ecuación 3)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La elucidación de las estructuras de los sistemas $C_{60}(Gly)_4$ y $C_{60}(Arg)_8$ se realizó mediante un enfoque sistemático, este consistió en adicionar uno por uno los aminoácidos hasta completar un total de cuatro glicinas y ocho argininas sobre la superficie de C_{60}. Para la primera adición, al ser C_{60} una estructura en la que todos los carbonos son equivalentes es indistinto la posición en la que agrega el primer residuo, sin embargo, tras esta primera adición la simetría del sistema del sistema se pierde, generando carbonos inequivalentes de los que puede ya no esperarse la misma reactividad, debido a esto, se empleó como guía la $\boldsymbol{f^+(\vec{r})}$.

En la Figura 1 (a) se muestran las isosuperficies de este descriptor, en esta, aquellos carbonos en los que se pueden visualizarse lóbulos de color morado claro son aquellos sitios más susceptibles a adiciones electrofílicas. A partir de esta guía se consideraron diferentes propuestas para la adición del segundo aminoácido en cada caso. Todas las propuestas fueron optimizadas y calcularon sus frecuencias vibracionales al nivel de teoría antes descrito. En la primera sección de la Tabla 1 se muestran las energías relativas para las propuestas de $C_{60}(Arg)_2$, siendo la más estable la estructura en la que fueron adicionados el carbono 27 con la segunda arginina y el 26 con hidrógeno. Podemos apreciar también de los datos de la Tabla 1, como el siguiente isómero en orden de estabilidad es

relativamente cercado, sin embargo, el tercero está considerablemente lejos en términos energéticos dando una energía relativa de 378.13 kcal/mol.

Una vez determinada la estructura más estable para el sistema $C_{60}(Arg)_2$, sobre esta se calculó de nuevo la $f^+(\vec{r})$ (ver Figura 1 (b)) y se realizaron las propuestas del sistema $C_{60}(Arg)_3$. Podemos observar en la segunda sección de la Tabla 2 que el isómero más estable tiene lugar cuando la tercer arginina se adiciona sobre el carbono 16 y el hidrógeno sobre el hidrógeno sobre el carbono 17. Hasta este punto consideramos importante resaltar que la adición de las argininas parece tener cierta

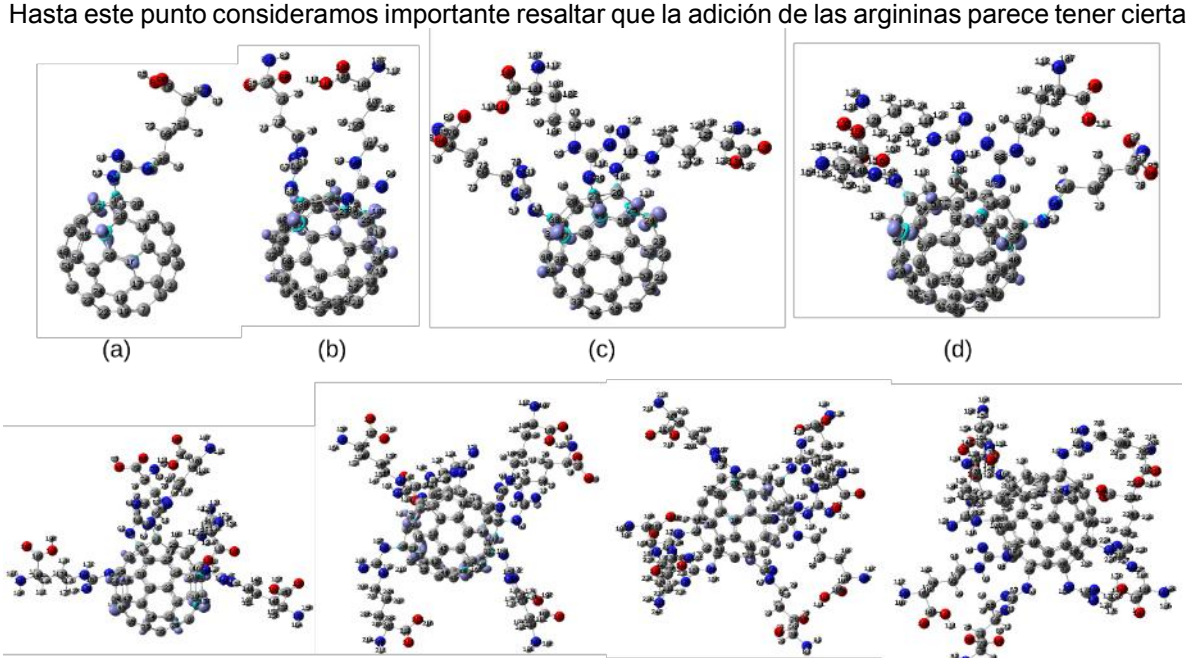


Figura 4. Estructuras más estables de los sistemas (a) $C_{60}Arg$, (b) $C_{60}(Arg)_2$, (c) C60(Arg)3, (d) $C_{60}(Arg)_4$, (e) $C_{60}(Arg)_5$, (f) $C_{60}(Arg)_6$, (g) $C_{60}(Arg)_7$ y (h) $C_{60}(Arg)_8$.

preferencia concentrarse en un solo lado de la jaula del fullereno, lo que al menos a este grado de recubrimiento sugiere una clara localización de los grupos funcionales. Para tres argininas podemos observar además que las energías relativas arrojan diferencias más moderadas, dando 6.29 kcal/mol y 14.01 kcal/mol para el segundo y tercer isómero respectivamente.

Este mismo enfoque guiado por la $f^+(\vec{r})$ se utilizó también para encontrar las estructuras de menor energía para los sistemas $C_{60}(Arg)_4$, $C_{60}(Arg)_5$, $C_{60}(Arg)_6$, $C_{60}(Arg)_7$ y $C_{60}(Arg)_8$. Al analizar la información de la Tabla 2 en las secciones subsecuentes, podemos observar que las energías relativas entre el isómero más estable con cuatro argininas y los otros dos son considerables de 14.74 y 16.85 kcal/mol, no obstante, para las propuestas de cinco argininas esto se revierte, dando energías relativas más cercanas de 1.7 y 2.8 kcal/mol. Con seis argininas se puede apreciar que paso algo semejante al sistema $C_{60}(Arg)_2$, es decir, en el orden de estabilidad el segundo isómero presenta energía relativa baja pero el tercero muestra una brecha energética más amplia. Para las propuestas restantes con siete y ocho sustituyentes las diferencias entre el isómero más estable y el segundo son de por lo menos 30 kcal/mol, lo que muestra para estos grados de recubrimiento, una clara tendencia a una estructura determinada. Desde el punto de vista estructural, como se puede apreciar en la Figura 1, a lo largo de las adiciones podemos resaltar que, siempre arginina recién añadida queda cerca de la o las anteriores, lo que genera una un claro patrón de adición sobre en fullereno. Con forme el número de argininas aumenta hasta ocho, tal como se puede ver en la Figura 1 (h), las argininas rodean al fullereno, situándose como una especie de cinturón sobre la jaula del carbono, dejando a cada lado una cara de carbonos de la jaula del C_{60}. Este patrón de adición resulta cuando menos interesante, en el sistema quedan dos caras en las que el sistema π-conjugado del fullereno permanece intacto, lo que podría aún ser útil para explicar el carácter anfifílico reportado experimentalmente para este sistema, además, esas regiones de carbono a los

costados podrían captar especies reactivas de oxígeno, una característica sumamente relevante en sistemas con interés biológico.

Tabla 4. Energías relativas entre las diferentes propuestas basadas en la función de Fukui $f^+(\vec{r})$ para los sistemas $C_{60}(Arg)_x$ (*x=2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8*).

Propuesta de $C_{60}(Arg)_x$	Carbonos adicionados	Energía relativa (kcal/mol)
$C_{60}(Arg)_2$-A	C31 y C32	378.13
$C_{60}(Arg)_2$-B	C16 y C17	1.07
$C_{60}(Arg)_2$-C	C27 y C26	0.00
$C_{60}(Arg)_3$-A	C18 y C19	6.29
$C_{60}(Arg)_3$-B	C31 y C32	14.01
$C_{60}(Arg)_3$-C	C16 y C17	0.00
$C_{60}(Arg)_4$-A	C7 y C8	14.74
$C_{60}(Arg)_4$-B	C31 y C32	16.85
$C_{60}(Arg)_4$-C	C18 y C19	0.00
$C_{60}(Arg)_5$-A	C20 y C56	1.70
$C_{60}(Arg)_5$-B	C31 y C32	0.00
$C_{60}(Arg)_5$-C	C51 y C52	2.80
$C_{60}(Arg)_6$-A	C48 y C51	21.48
$C_{60}(Arg)_6$-B	C43 y C57	0.78
$C_{60}(Arg)_6$-C	C20 y C56	0.00
$C_{60}(Arg)_7$-A	C9 y C2	32.11
$C_{60}(Arg)_7$-B	C33 y C44	0.00
$C_{60}(Arg)_8$-A	C29 y C58	27.35
$C_{60}(Arg)_8$-B	C10 y C09	0.00
$C_{60}(Arg)_8$-C	C4 y C12	30.60

En el mismo sentido, en la Tabla 2 se muestran las energías relativas para las adiciones progresivas de glicinas al fullereno C_{60}. Dentro de las propuestas para la segunda adición, se encontró que la estructura más estable es aquella en la glicina se agrega en el carbono C9 y el hidrógeno en el C8, presentando energías relativas el segundo y tercer isómero de 5.50 kcal/mol y 6.88 kcal/mol, respectivamente, desde el punto de vista estructural, como se puede apreciar en la Figura 2 (b), la segunda glicina queda próxima a la primera, lo que de nueva cuenta da evidencia de que los aminoácidos al igual que con la arginina, prefieren adicionarse en posiciones cercana en vez de separadas entre sí. Este mismo comportamiento lo podemos observar tras la tercera adición, donde resulta que la adición más favorable de glicina es en el carbono 20 y el hidrogeno carbono 21 (ver Figura 2 (c), y donde las energías relativas de las otras propuestas son de 3.23 y 4.76 kcal/mol. Para la cuarta y última adición de glicina sobre el C_{60}, de nueva cuenta la estructura resultante es 3.80 y 4.76 kcal/mol más estable que el segundo y tercer isómero en orden de estabilidad. Estructuralmente la adición se da tal forma que las cuatro glicinas quedan sobre la misma región de la jaula del fullereno, como se muestra en la Figura 2 (d), lo que deja un sistema molecular con dos zonas claramente diferenciadas, una con los grupos funcionales polares y otra más en la que al permanecer intacto el sistema π-conjugado, lo que también contribuye a la explicación del carácter antioxidante del sistema $C_{60}(Gly)_4$.

Tabla 5: Energías relativas entre las diferentes propuestas basadas en la función de Fukui $f^+(\vec{r})$ para los sistemas $C_{60}(Gly)_x$ (*x=2, 3 y 4*).

Propuesta de $C_{60}(Gly)_x$	Carbonos adicionados	Energía relativa (kcal/mol)
$C_{60}(Gly)_2$-A	C58 y C40	6.88
$C_{60}(Gly)_2$-B	C20 y C21	5.50
$C_{60}(Gly)_2$-C	C9 y C8	0.00
$C_{60}(Gly)_3$-A	C22 y C23	3.23
$C_{60}(Gly)_3$-B	C58 y C40	4.76
$C_{60}(Gly)_3$-C	C20 y C21	0.0
$C_{60}(Gly)_4$-A	C52 y C51	3.80

$C_{60}(Gly)_4$-B	C58 y C40	4.76
$C_{60}(Gly)_4$-C	C22 y C23	0.00

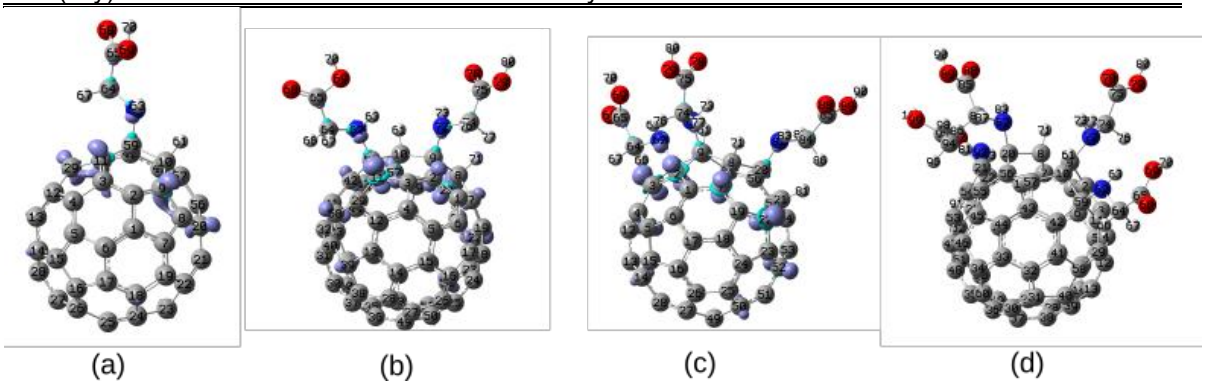


Figura 5. Configuraciones más estables de los sistemas (a) $C_{60}(Gly)$, (b) $C_{60}(Gly)_2$, (c) $C_{60}(Gly)_3$ y (d) $C_{60}(Gly)_4$.

Una vez determinadas las estructuras más estables para los sistemas $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$, se llevó a cabo la comparación de los índices de reactividad global del potencial de ionización (*PI*) y afinidad electrónica (*AE*) de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3. Donde en el caso del PI cuanto más bajo es, mejor capacidad de donar electrones es esperada, mientras que cuanto mayor sea la AE mayo tendencia tendría el sistema aceptar electrones. En este sentido, de los datos de la Tabla 3, podemos observar como el sistema $C_{60}(Arg)_8$ sería a la vez un mejor donador y aceptor de electrones que el $C_{60}(Gly)_4$. Al realizar esta comparación con el C_{60} podemos observar también que ambos sistemas con arginina o glicina mejoran tanto la capacidad de donar electrones como de aceptarlos, demostrando que estos sistemas no solo mejorarían la biocompatibilidad, sino que potenciarían la capacidad antirradicalaria, volviéndolos candidatos interesantes en diversas aplicaciones biomédicas.

Tabla 6: Potencial de ionización (PI) y afinidad electrónica (AE) de los sistemas más estables $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$.

Sistema	*PI* (eV)	*AE* (eV)
C_{60}	7.61	2.45
$C_{60}(Arg)_8$	5.64	3.76
$C_{60}(Gly)_4$	6.38	2.70

CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluaron los sistemas $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$ mediante cálculos DFT, con el propósito de analizar la regioselectividad de la funcionalización múltiple del C_{60} con aminoácidos. Para ello, se empleó la función de Fukui para ataque nucleofílico $\boldsymbol{f}^{+}(\vec{\boldsymbol{r}})$, como descriptor de reactividad local, lo que permitió identificar los sitios de la jaula de fullereno con mayor susceptibilidad a la adición progresiva de arginina y glicina.

A partir de esta estrategia, se generaron diferentes configuraciones estructurales y se compararon mediante sus energías relativas. Los resultados permitieron identificar las geometrías más favorables para $C_{60}(Arg)_8$ y $C_{60}(Gly)_4$ mostrando que la distribución de los aminoácidos sobre la jaula del fullereno no ocurre de manera arbitraria, sino que responde a diferencias locales de reactividad electrónica. En este sentido, el análisis de Fukui proporcionó un criterio cualitativo para orientar la formación de los aductos más probables.

Asimismo, el cálculo del potencial de ionización (PI) y la afinidad electrónica (AE) permitió evaluar el efecto de la funcionalización sobre las propiedades electrónicas del sistema. Las variaciones observadas respecto al C_{60} prístino indican que la incorporación de argininas y glicinas modifican la

capacidad de donar o aceptar electrones, siendo este efecto más marcado en $C_{60}(Arg)_8$, aunque también relevante en $C_{60}(Gly)_4$ respecto al fullereno prístino C_{60}.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. (1985). C60: Buckminsterfullerene. Nature, 318, 162–163.
2. Prinzbach, H., Weiler, A., Landenberger, P., Wahl, F., Wörth, J., Scott, L. T., Gelmont, M., Olevano, D., & von Issendorff, B. (2000). Gas-phase production and photoelectron spectroscopy of the smallest fullerene, C20. Nature, 407, 60–63.
3. Wang, S., Yang, S., & Shi, Z. (2020). Structural studies of giant empty and endohedral fullerenes. Frontiers in Chemistry, 8, 607712.
4. McEwen, C. N., McKay, R. G., & Larsen, B. S. (1992). C60 as a radical sponge. Journal of the American Chemical Society, 114(11), 4412–4414.
5. Yin, J. J., Lao, F., Fu, P. P., Wamer, W. G., Zhao, Y., Wang, P. C., Qiu, Y., Sun, B., Xing, G., Dong, J., Liang, X. J., & Chen, C. (2009). The scavenging of reactive oxygen species and the potential for cell protection by functionalized fullerene materials. Biomaterials, 30(4), 611–621.
6. Martínez, Z. S., et al. (2016). Fullerene derivatives strongly inhibit HIV-1 replication by affecting virus maturation without impairing protease activity. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 60(10), 5731–5741.
7. Hou, W., Xia, F., Alves, C. S., Qian, X., Yang, Y., & Cui, D. (2022). Application of fullerenes as photosensitizers for antimicrobial photodynamic inactivation: A review. Frontiers in Microbiology, 13, 957698.
8. Shi, J., Yu, X., Wang, L., Liu, Y., Gao, J., Zhang, J., Ma, R., Liu, R., & Zhang, Z. (2013). PEGylated fullerene/iron oxide nanocomposites for photodynamic therapy, targeted drug delivery and MR imaging. Biomaterials, 34(37), 9666–9677.
9. Tanzi, L., Terreni, M., Zhang, Y., & Prato, M. (2022). Synthesis and biological application of glyco- and peptide derivatives of fullerene C60. European Journal of Medicinal Chemistry, 230, 114104.
10. Komin, A., Russell, L. M., Hristova, K. A., & Searson, P. C. (2017). Peptide-based strategies for enhanced cell uptake, transcellular transport, and circulation: Mechanisms and challenges. Advanced Drug Delivery Reviews, 110–111, 52–64.
11. Sharoyko, V. V., Shemchuk, O. S., Meshcheriakov, A. A., Andoskin, P. A., Petrov, A. V., Rumyantsev, A. M., ... & Semenov, K. N. (2024). Modification of fullerene with amino acids as a method for obtaining biocompatible materials with a protective effect. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 32(7), 631-639
12. Sharoyko, V. V., Kukaliia, O. N., Darvish, D. M., Meshcheriakov, A. A., Iurev, G. O., Andoskin, P. A., ... & Semenov, K. N. (2024). Protective action of water-soluble fullerene adducts on the example of an adduct with L-arginine. Journal of Molecular Liquids, 401, 124702.
13. Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., et al. (2016). Gaussian 16, Revision C.01. Gaussian, Inc.
14. Fukui, K. (1982). Role of frontier orbitals in chemical reactions. science, 218(4574), 747-754.
15. Gázquez, J. L., Cedillo, A., & Vela, A. (2007). Electrodonating and electroaccepting powers. The Journal of Physical Chemistry A, 111(10), 1966-1970.

EFECTO DE LAS CADENAS LATERALES Y DEL NÚCLEO CONJUGADO SOBRE LAS PROPIEDADES ELECTRÓNICAS DE ACEPTORES NO FULERENOS BASADOS EN QUINOXALINA: Qx-1, Qx-2, Qx-BO-1, Qx-BO-2 Y Qx-BO-3

Montserrat Zamora Fonseca[1], Jaime Gustavo Rodríguez Zavala[2], José Guadalupe Facio Muñoz[2]

[1]Maestría en Ciencia y Tecnología [2]Departamento de Ciencias Exactas y Tecnología
Centro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara.
montserrat.zamora9121@alumnos.udg.mx

RESUMEN

La conversión de la luz solar en electricidad mediante materiales fotoactivos orgánicos representa un avance significativo[1], en el que el desempeño de las celdas solares orgánicas (CSO) depende en gran medida de los materiales aceptores. En particular, los aceptores no fulerenos (NFAs) basados en quinoxalina (Qx) han demostrado un alto potencial debido a su carácter electrodeficiente y a la versatilidad de su diseño molecular[2]. No obstante, el impacto específico de las modificaciones en la arquitectura de las cadenas laterales y en el tamaño del núcleo conjugado sobre las propiedades electrónicas y la eficiencia de la conversión de energía aún no se comprenden completamente, lo que constituye precisamente la motivación del presente trabajo. En este estudio, se aborda directamente este desafío mediante un análisis computacional, basado en la Teoría del Funcional de la Densidad (DFT)[3], de las moléculas aceptoras: Qx-1, Qx-2, Qx-BO-1, Qx-BO-2 y Qx-BO-3. Los cálculos se realizaron empleando el funcional HSE[4] con el conjunto base 6-311++G**, todas las simulaciones se realizaron utilizando el software Gaussian 16[5], mientras que la construcción y visualización de las estructuras moleculares se llevaron a cabo con GaussView. A partir de los cálculos realizados, se analizaron las propiedades estructurales y electrónicas de los sistemas estudiados. En primer lugar, se optimizaron las geometrías moleculares verificando que correspondieran a mínimos sobre la superficie de energía potencial. Los resultados muestran que la presencia de cadenas alquílicas ramificadas incrementa el momento dipolar e inducen una distribución de carga tridimensional. Asimismo, los derivados de Qx presentan bajas energías de reorganización lo que sugiere un transporte electrónico eficiente. El análisis de los índices de reactividad indica que las modificaciones en las cadenas laterales, así como el tamaño del núcleo central, tienen un efecto limitado sobre la capacidad aceptora global de estas moléculas. No obstante, en presencia de solvente, se observa una mejora en la capacidad electroaceptora, reflejada en valores más altos de afinidad electrónica, poder electroaceptor y electronegatividad aceptora en comparación con la fase gaseosa. Finalmente, se concluye que las estructuras optimizadas presentan diferencias geométricas asociadas a la presencia de cadenas alquílicas ramificadas, las cuales modifican el ángulo y la orientación de las cadenas respecto al esqueleto conjugado; sin embargo, estas variaciones no alteran la localización de los orbitales moleculares de frontera. A pesar de las diferencias estructurales, los índices de reactividad de las moléculas resultan altamente similares, y los valores obtenidos para los niveles HOMO y LUMO muestran buena concordancia con los datos experimentales reportados en la literatura[6, 7].

INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los combustibles fósiles y la necesidad de garantizar el acceso sostenible a la energía han impulsado la búsqueda de fuentes renovables, entre las cuales la energía solar se destaca por su disponibilidad y viabilidad tecnológica[8]. En este contexto, uno de los enfoques más prometedores es el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas, especialmente las CSO, que ofrecen ventajas notables como flexibilidad, bajo costo de fabricación y ligereza[9].

Durante las últimas décadas, la eficiencia de conversión de potencia (PCE) de las CSO ha aumentado significativamente gracias al diseño de nuevos materiales fotoactivos. Entre estos, los NFAs han jugado un papel fundamental debido a su capacidad para optimizar la absorción de luz y

el transporte de carga[10]. En particular, los NFAs basados en Qx han demostrado un alto potencial debido a su carácter electrodeficiente y a la versatilidad de su diseño molecular[11]. Investigaciones recientes han demostrado que las moléculas de la serie Qx presentan menores pérdidas de energía, lo que se traduce en una conversión más eficiente del excitón[12].

No obstante, el impacto específico de las modificaciones en la arquitectura de las cadenas laterales y en el tamaño del núcleo conjugado sobre las propiedades electrónicas y la eficiencia de la conversión de energía aún no se comprenden completamente, dado el efecto crucial de estas variaciones estructurales en el desempeño fotovoltaico de los NFAs, resulta indispensable abordar su estudio desde una perspectiva teórica detallada. Por ello, este trabajo se enfoca en un análisis computacional de las moléculas aceptoras Qx-1, Qx-2, Qx-BO-1, Qx-BO-2 y Qx-BO-3. El objetivo es analizar su comportamiento electrónico, la influencia de sus ramificaciones y el efecto del medio de solvatación, con la finalidad de proponer modificaciones estructurales que permitan mejorar su capacidad electroaceptora y, por ende, su desempeño fotovoltaico.

METODOLOGÍA

El estudio se basó en la DFT, empleando el paquete de software Gaussian 16[5] para ejecutar todas las simulaciones, que abarcaron optimizaciones de geometría, análisis de frecuencias vibracionales, cálculos de puntos únicos y la evaluación del efecto del solvente mediante el modelo SMD (modelo de solvatación basado en densidad). Como etapa fundamental, se llevó a cabo una selección meticulosa del nivel de teoría (funcional y conjunto base) mediante una comparativa exhaustiva entre los resultados teóricos y los registros experimentales de la literatura[6,7]. Este proceso de validación tuvo como prioridad alcanzar una coincidencia precisa en las energías de los Orbitales Moleculares de Frontera (OMF), el HOMO (Orbital Molecular más Alto Ocupado), el cual actúa como un indicador de la capacidad de donación electrónica; el LUMO (Orbital Molecular más Bajo Desocupado), indicador para la capacidad de aceptación de carga; y la banda prohibida E_g, definida como la brecha energética entre ambos OMF y un parámetro esencial para el rendimiento fotovoltaico. La comparación directa entre las cifras obtenidas y los valores experimentales resultó esencial para garantizar que el modelo computacional seleccionado describiera con precisión la configuración electrónica de las moléculas aceptoras bajo investigación.

Para la evaluación inicial de los funcionales PBE[13], B3LYP[14,15], PBE0[16], BPV86[17,18,19] y HSE[4], se utilizó el conjunto base 6-31G**, seleccionado estratégicamente por ofrecer un óptimo equilibrio entre precisión y costo computacional. Los resultados demuestran que el funcional HSE[4] proporciona la descripción más precisa de las propiedades optoelectrónicas para esta serie de NFAs. Al incorporar una fracción de intercambio exacto de corto alcance, este funcional híbrido logra mitigar los errores de autointeracción electrónica, resultando en una diferencia promedio para los niveles HOMO y LUMO inferior a 0.30 eV respecto a las mediciones experimentales[6,7]. Un nivel de precisión notable se alcanzó con las moléculas Qx-BO-1 y Qx-BO-2. Para Qx-BO-1, el funcional reprodujo con notable exactitud el nivel HOMO experimental de −5.56 eV con una discrepancia de tan solo 0.19 eV, y el LUMO experimental de −3.74 eV con una diferencia mínima de 0.04 eV. De manera similar, para Qx-BO-2 se obtuvieron desviaciones de apenas 0.13 eV en el HOMO frente al valor experimental de −5.50 eV y de 0.09 eV en el LUMO frente al valor reportado de −3.80 eV.

En conjunto, estos resultados evidencian que la elección del funcional tiene un impacto significativo en la calidad de los resultados, destacando que HSE[4] logra un mejor equilibrio entre precisión y estabilidad, con desviaciones pequeñas y consistentes que se traducen en una mejor concordancia con los datos experimentales.

Una vez seleccionado el funcional, se desarrolló un barrido de conjuntos base, calculando la diferencia con respecto a datos experimentales. De entre la extensa comparativa de conjuntos de base analizados en este estudio, el conjunto 6-311++G** destaca significativamente por su superior capacidad predictiva. Este conjunto base fue el único capaz de reproducir con una precisión absoluta el nivel energético del orbital LUMO para la molécula aceptora Qx-1, en comparación con los datos reportados experimentalmente. La relevancia de este resultado puntual radica en que el orbital

LUMO constituye uno de los descriptores electrónicos más críticos para el desempeño de las CSO. Al ser el nivel que rige la capacidad de aceptación de electrones y determinar, junto con el HOMO del donador, el potencial de circuito abierto (V_{OC})[20], su correcta estimación es indispensable para validar cualquier modelo teórico que busque explicar la eficiencia fotovoltaica.

El resultado excepcional del conjunto base 6-311++G** puede fundamentarse en su sofisticada arquitectura matemática. Al ser un conjunto base de triple valencia dividida[21], ofrece una descripción más detallada de los electrones de valencia. Aunado a esto, la inclusión de funciones difusas (++), son esenciales para describir la densidad electrónica lejos del núcleo, lo cual es fundamental en sistemas con alta deslocalización electrónica o estados aniónicos[22] y funciones de polarización (**), que añaden flexibilidad a los orbitales al permitirles cambiar su forma y orientación, mejorando la descripción de los enlaces químicos y los efectos de polarización intramolecular en el esqueleto conjugado de la Qx[23].

Esta combinación de alta flexibilidad electrónica y profundidad analítica permite capturar de manera precisa las sutiles variaciones en la nube electrónica de los NFAs, consolidando a HSE/6-311++G** como el nivel de teoría de referencia para el análisis de esta serie de moléculas.

RESULTADOS

Orbitales moleculares de frontera.

Las geometrías moleculares fueron completamente optimizadas hasta alcanzar sus mínimos de energía, verificando la ausencia de frecuencias imaginarias para garantizar que correspondieran a mínimos sobre la superficie de energía potencial. A partir de estas estructuras, el estudio de los OMF es fundamental para comprender las propiedades optoelectrónicas y los mecanismos de transferencia de carga en materiales orgánicos semiconductores. Analizar las distribuciones espaciales de las densidades electrónicas de estas superficies permite identificar las regiones moleculares responsables de la donación (HOMO) y aceptación (LUMO) de electrones. Tanto las estructuras optimizadas como sus correspondientes superficies de densidad de OMF se presentan en la Figura 1.

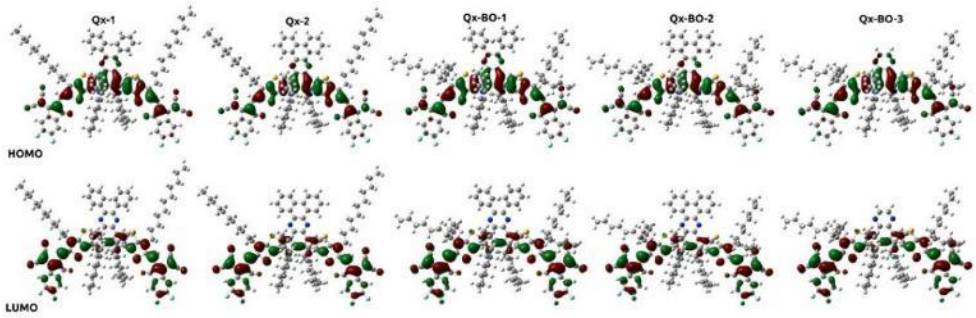


Figura 6. Estructuras optimizadas y distribución de OMF.



Figura 7. Fragmentación.

Según el análisis de la Figura 6, se observa que en todas las moléculas estudiadas el HOMO se localiza predominantemente sobre el esqueleto central **π**-conjugado (ver Figura 7). Por su parte, el LUMO presenta una deslocalización extendida donde la densidad electrónica se desplaza notablemente hacia los grupos aceptores terminales (ver Figura 7) confirmando su rol como unidades de atracción electrónica.

A partir de esta observación, se concluye claramente que las cadenas laterales alquílicas ramificadas no influyen en dicha distribución electrónica, cumpliendo una función estrictamente estérica y de solubilidad[24]. Los pares comparativos Qx-1 vs Qx-BO-1 y Qx-2 vs Qx-BO-2 muestran superficies orbitales prácticamente idénticas, lo que demuestra que las ramificaciones no alteran la naturaleza electrónica del esqueleto central. Esta comparación estructural significa que es posible modular la solubilidad y el procesamiento del material sin afectar sus propiedades de aceptación intrínsecas.

Momento dipolar.

El análisis del momento dipolar constituye una herramienta clave para comprender la distribución de la densidad electrónica y los efectos de polarización en los materiales orgánicos semiconductores. En el contexto de las CSO, la magnitud y la orientación de este vector influyen directamente en propiedades fundamentales, tales como la solubilidad de los componentes y los mecanismos de separación y transferencia de carga intermoleculares[25]. Evaluar este parámetro permite predecir cómo las variaciones en la arquitectura molecular alteran el entorno electrostático intrínseco de los sistemas en estudio. A continuación, en la Tabla 7, se presentan los valores calculados para el momento dipolar total, expresados en Debye (D), junto con sus respectivas contribuciones vectoriales en los ejes cartesianos, evaluados comparativamente tanto en fase gas (FG) como en presencia de cloroformo (CF).

Tabla 7. Momento dipolar.

Molécula	FG (D)	CF (D)	Componentes cartesianas del momento bipolar		
			X	Y	Z
Qx-1	5.08	4.70	0.03	1.99	0.21
Qx-2	4.75	4.43	0.03	1.86	0.18
Qx-BO-1	5.68	7.27	0.03	2.03	0.93
Qx-BO-2	5.37	6.41	0.06	1.89	0.95
Qx-BO-3	4.55	5.10	0.03	1.61	0.78

El análisis detallado del momento dipolar revela una transición estructural y electrónica significativa al comparar las series de moléculas. Específicamente, el incremento notable en la componente del eje Z, que alcanza valores cercanos a 0.9 D en las arquitecturas de la serie BO, sugiere que la ramificación de las cadenas alquílicas induce una torsión geométrica en el esqueleto molecular. Esta distorsión favorece una distribución de carga tridimensional más compleja, elevando el momento dipolar total hasta alcanzar los 5.68 D en FG para Qx-BO-1. Tal comportamiento es fundamental en el contexto de las CSO, ya que un momento dipolar prominente y bien orientado puede facilitar la separación de excitones y mejorar el transporte de carga en la capa activa[26].

La inclusión de CF como solvente induce un acoplamiento dieléctrico que refuerza esta polarización, alcanzando un valor de 7.27 D para Qx-BO-1. Este incremento, impulsado por la redistribución electrónica en las ramificaciones, puede potenciar el campo eléctrico interno necesario para separar las cargas. Sin embargo, desde una perspectiva de diseño de materiales, debe mantenerse un equilibrio; magnitudes de momento dipolar que superan el umbral de los 5.0–6.0 D en solución podrían comprometer la cristalinidad y propiciar pérdidas por recombinación no radiativa, afectando la eficiencia global del dispositivo[27].

Índices de reactividad.

En esta sección se analizan las propiedades relacionadas con la capacidad de donación y aceptación de carga de las moléculas bajo estudio. Dichos descriptores permiten estimar de manera cuantitativa el comportamiento electrónico de los sistemas moleculares.

Para ello, se calcularon los siguientes índices de reactividad global tanto en fase gaseosa (FG) como en el solvente cloroformo (CF): el potencial de ionización (*I*) y la afinidad electrónica (*A*)[28], los cuales miden las barreras energéticas para remover o adicionar un electrón del sistema, respectivamente. Asimismo, se evaluaron la electronegatividad donadora (χ^-) y aceptora (χ^+), que cuantifican la resistencia de la molécula a perder o ganar densidad electrónica de manera respectiva, junto con el poder electrodonador (ω^-) y electroaceptor (ω^+)[29], los cuales estiman la estabilización energética neta cuando el sistema transfiere o recibe carga correspondientemente.

En este contexto, valores bajos de *I*, χ^- y ω^- indican una mejor capacidad de donación electrónica; por el contrario, magnitudes elevadas de *A,* χ^+, y ω^+ se correlacionan directamente con una mayor capacidad aceptora de carga. Los resultados de estos parámetros, expresados en electronvolts (eV), se presentan en la Tabla 2.

Tabla 8. Índices de reactividad.

Solvente	Molécula	*I*	*A*	χ^-	χ^+	ω^-	ω^+
FG	Qx-1	6.53	3.11	5.67	3.96	9.40	4.58
	Qx-2	6.52	3.12	5.67	3.97	9.47	4.65
	Qx-BO-1	6.53	3.11	5.67	3.96	9.41	4.60
	Qx-BO-2	6.52	3.13	5.67	3.97	9.48	4.65
	Qx-BO-3	6.61	3.11	5.73	3.99	9.41	4.55
CF	Qx-1	5.53	3.59	5.04	4.07	13.11	8.55
	Qx-2	5.52	3.59	5.03	4.07	13.17	8.62
	Qx-BO-1	5.52	3.57	5.03	4.06	12.99	8.45
	Qx-BO-2	5.51	3.58	5.03	4.06	13.07	8.52
	Qx-BO-3	5.56	3.58	5.07	4.07	12.92	8.35

Al evaluar los índices de reactividad global en FG, se observa de manera evidente que los valores para la serie de derivados de Qx son prácticamente idénticos entre sí. Por ejemplo, el *I* fluctúa en un margen muy estrecho, desde 6.52 eV para Qx-2 hasta 6.61 eV para Qx-BO-3, mientras que la *A* se mantiene en un rango de 3.11 a 3.13 eV. Esta notable uniformidad se extiende al ω+, el cual se concentra alrededor de 4.6 eV para todas las moléculas. Estos resultados evidencian que las sutiles variaciones en la arquitectura de las cadenas laterales o el tamaño del núcleo conjugado ejercen un efecto insignificante sobre las fronteras energéticas globales en un entorno aislado.

Dado que las diferencias estructurales no alteran sustancialmente el perfil de reactividad intrínseco de los aceptores, el fenómeno más destacable y determinante es el profundo impacto del medio de solvatación. La transición de FG al solvente CF induce una modulación en las magnitudes absolutas de todos los descriptores evaluados debido al acoplamiento dieléctrico[30]. Por un lado, se detecta una caída generalizada de aproximadamente 1.0 eV en el *I* (∼5.5 eV) y una reducción en la χ^-. Por otro lado, el poder electrodonador (ω^-) experimenta un incremento notable, elevándose de ∼9.4 eV a valores que superan los 12.9 eV en solución.

Los índices asociados al carácter aceptor (*A*, χ^+ y ω^+) experimentan un incremento uniforme y pronunciado en presencia de cloroformo. La *A* asciende a un promedio de ∼3.59 eV, mientras que

el ω^+ prácticamente se duplica, pasando del rango de los 4.6 eV en FG a magnitudes entre 8.35 y 8.62 eV en solución. Este comportamiento demuestra de forma concluyente que, independientemente de la ramificación o del tamaño del núcleo, la estabilización dieléctrica provista por el solvente favorece de manera notable la capacidad de captación electrónica de estas arquitecturas moleculares, consolidando su eficacia como materiales aceptores en medios condensados.

Energías de reorganización.

El análisis de las energías de reorganización (λ) constituye un factor crítico para evaluar la cinética del transporte de carga en semiconductores orgánicos[29]. Este parámetro cuantifica la barrera energética interna derivada de la relajación geométrica y la reorganización de los enlaces nucleares que experimenta una molécula al ganar o perder un electrón. Específicamente, la energía de reorganización de huecos (λ^+) representa el costo energético que asume la molécula para reorganizarse estructuralmente después de perder un electrón, determinando la facilidad del transporte de carga positiva; mientras que la energía de reorganización de electrones (λ^-) evalúa este costo energético cuando la molécula gana un electrón, indicando su capacidad para el transporte de carga negativa. Minimizar estas magnitudes es fundamental, ya que valores más bajos de λ^- se traducen directamente en una mayor tasa de transferencia electrónica y menores pérdidas por recombinación[31]. A continuación, en la Tabla 9 se presentan las λ intramolecular calculadas para la serie de derivados de Qx, evaluadas comparativamente en FG y bajo el efecto del medio de solvatación CF.

Tabla 9. Energías de reorganización.

Solvente	Molécula	λ^+	λ^-
FG	Qx-1	0.17	0.12
	Qx-2	0.17	0.12
	Qx-BO-1	0.18	0.12
	Qx-BO-2	0.17	0.12
	Qx-BO-3	0.17	0.12
CF	Qx-1	0.17	0.10
	Qx-2	0.16	0.10
	Qx-BO-1	0.17	0.11
	Qx-BO-2	0.17	0.11
	Qx-BO-3	0.17	0.12

En FG, todas las moléculas de la serie presentan valores de λ^- menores que los de λ^+. Mientras que las λ^+ se sitúan en un rango estrecho de 0.16 a 0.17 eV, las λ^- caen de manera homogénea a magnitudes de 0.12 eV. Esta marcada diferencia indica una menor distorsión geométrica en los estados aniónicos respecto a los catiónicos, lo que sugiere una predisposición intrínseca en toda la serie hacia un transporte electrónico más eficiente y acelerado.

En el medio solvatado, los valores de λ^+ se mantienen prácticamente inalterados respecto a la FG, exhibiendo una resistencia a la polarización del medio. Por el contrario, los valores de λ^- experimentan un descenso disminuyendo hasta alcanzar el umbral de 0.10 eV para sistemas como Qx-1 y Qx-2.

El hecho de que las energías de reorganización mínimas correspondan de manera sistemática a los electrones λ^-, tanto en FG como en solución, coincide plenamente con la naturaleza electroaceptora de estas arquitecturas moleculares, confirmando su idoneidad termodinámica para actuar como componentes aceptores en la capa activa de las celdas solares orgánicas.

CONCLUSIONES

En este trabajo, la validación del enfoque metodológico resultó un factor crítico; el empleo del nivel de teoría HSE/6-311++G** permitió obtener una excelente concordancia con los datos experimentales, logrando diferencias menores a 0.30 eV en la estimación de los niveles energéticos. A partir de este análisis computacional de las moléculas Qx-1, Qx-2, Qx-BO-1, Qx-BO-2 y Qx-BO-3, se demuestra que la presencia de cadenas alquílicas ramificadas induce una distribución de carga tridimensional. Este fenómeno está estrechamente ligado a la distorsión estérica provocada por dichas cadenas alquílicas, las cuales inducen un ángulo de torsión significativo entrec el plano del esqueleto conjugado de la Qx. Por otra parte, se plantea que estas modificaciones estructurales influyen mayoritariamente en aspectos de solubilidad y efectos estéricos, dado que la ubicación de los OMF permanece prácticamente inalterada a pesar de las diferencias estructurales entre moléculas. El análisis de los índices de reactividad indica que las modificaciones en las cadenas laterales y el tamaño del núcleo central tienen un efecto limitado sobre la capacidad aceptora global en FG. No obstante, en presencia de solvente CF se observa una mejora sustancial en la capacidad electroaceptora de los sistemas, reflejada en valores más altos de A, ω^+ y χ^+. Asimismo, los derivados de Qx exhiben λ^- bajas en comparación con λ^+. Esta marcada reducción coincide con el comportamiento esperado para sistemas electrodeficientes, lo que sugiere un transporte electrónico intrínsecamente más eficiente y confirma su idoneidad como aceptores en la capa activa.

BIBLIOGRAFÍA

1. E. Antolín, J. Urieta-Mora, A. Molina-Ontoria, N. Martín, “Functionalization of fullerenes for photovoltaic applications”, Curr. Opin. Colloid Interface Sci., Vol. 76, 2025, p. 101893.
2. D. Gedefaw, M. Prosa, M. Bolognesi, M. Seri, M. R. Andersson, “Recent development of quinoxaline based polymers/small molecules for organic photovoltaics”, Adv. Energy Mater., Vol. 7, 21, 2017, p. 1700575.
3. W. Kohn, L. J. Sham, “Self-consistent equations including exchange and correlation effects”, Phys. Rev., Vol. 140, 4A, 1965, pp. A1133–A1138.
4. J. Heyd, G. E. Scuseria, M. Ernzerhof, “Hybrid functionals based on a screened Coulomb potential”, J. Chem. Phys., Vol. 118, 18, 2003, pp. 8207–8215.M.
5. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, G. E. Scuseria, M. A. Robb, J. R. Cheeseman, G. Scalmani, V. Barone, G. A. Petersson, H. Nakatsuji, X. Li, M. Caricato, A. V. Marenich, J. Bloino, B. G. Janesko, R. Gomperts, B. Mennucci, H. P. Hratchian, J. V. Ortiz, A. F. Izmaylov, J. L. Sonnenberg, D. Williams-Young, F. Ding, F. Lipparini, F. Egidi, J. Goings, B. Peng, A. Petrone, T. Henderson, D. Ranasinghe, V. G. Zakrzewski, J. Gao, N. Rega, G. Zheng, W. Liang, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J. Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, T. Vreven, K. Throssell, J. A. Montgomery, Jr., J. E. Peralta, F. Ogliaro, M. J. Bearpark, J. J. Heyd, E. N. Brothers, K. N. Kudin, V. N. Staroverov, T. A. Keith, R. Kobayashi, J. Normand, K. Raghavachari, A. P. Rendell, J. C. Burant, S. S. Iyengar, J. Tomasi, M. Cossi, J. M. Millam, M. Klene, C. Adamo, R. Cammi, J. W. Ochterski, R. L. Martin, K. Morokuma, O. Farkas, J. B. Foresman, D. J. Fox, Gaussian 16, Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2016.
6. Y. Shi, Y. Chang, K. Lu, Z. Chen, J. Zhang, Y. Yan, D. Qiu, Y. Liu, M. A. Adil, W. Ma, Z. Wei, “Small reorganization energy acceptors enable low energy losses in non-fullerene
7. X. Ran, Y. Shi, D. Qiu, J. Zhang, K. Lu, Z. Wei, “The central core size effect in quinoxaline-based non-fullerene acceptors for high v oc organic solar cells”, Nanoscale, Vol. 15, 45, 2023, pp. 18291–18299.
8. M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, R. Goic, “A review of solar thermal technologies”, Renew. Sust. Energ. Rev., Vol. 14, 1, 2010, pp. 312–322.
9. K. Fukuda, K. Yu, T. Someya, “The future of flexible organic solar cells”, Adv. Energy Mater., Vol. 10, 25, 2020, p. 2000765.
10. Y. Li, W. Huang, D. Zhao, L. Wang, Z. Jiao, Q. Huang, P. Wang, M. Sun, G. Yuan, “Recent progress in organic solar cells: A review on materials from acceptor to donor”, Molecules, Vol. 27, 6, 2022, p. 1800.

11. D. Gedefaw, M. Prosa, M. Bolognesi, M. Seri, M. R. Andersson, "Recent development of quinoxaline based polymers/small molecules for organic photovoltaics", Adv. Energy Mater., Vol. 7, 21, 2017, p. 1700575.
12. M. Xie, Z. Wei, K. Lu, “Quinoxaline-based y-type acceptors for organic solar cells”, Chem. Sci., Vol. 15, 22, 2024, pp. 8265–8279.
13. J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, “Generalized gradient approximation made simple”, Phys. Rev. Lett., Vol. 77, 18, 1996, pp. 3865–3868.
14. A. D. Becke, “Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange”, J. Chem. Phys., Vol. 98, 7, 1993, pp. 5648–5652.
15. P. J. Stephens, F. J. Devlin, C. F. Chabalowski, M. J. Frisch, “Ab initio calculation of vibratory circular dichroism spectra using density functional force fields”, J. Phys. Chem., Vol. 98, 45, 1994, pp. 11623–11627.
16. C. Adamo, V. Barone, “Toward reliable density functional methods without adjustable parameters: The PBE0 model”, J. Chem. Phys., Vol. 110, 13, 1999, pp. 6158–6170.
17. A. D. Becke, “Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior”, Phys. Rev. A, Vol. 38, 6, 1988, pp. 3098–3100.
18. J. P. Perdew, “Density-functional approximation for the correlation energy of the inhomogeneous electron gas”, Phys. Rev. B, Vol. 33, 12, 1986, pp. 8822–8824.
19. S. H. Vosko, L. Wilk, M. Nusair, “Accurate spin-dependent electron liquid correlation energies for local spin density calculations: a critical analysis”, Can. J. Phys., Vol. 58, 8, 1980, pp. 1200–1211.
20. M. C. Scharber, D. Mühlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A. J. Heeger, C. J. Brabec, “Design rules for donors in bulk-heterojunction solar cells—towards 10% energy-conversion efficiency”, Adv. Mater., Vol. 18, 6, 2006, pp. 789–794.
21. R. Krishnan, J. S. Binkley, R. Seeger, J. A. Pople, “Self-consistent molecular orbital methods. XX. A basis set for correlated wave functions”, J. Chem. Phys., Vol. 72, 1, 1980, pp. 650–654.
22. T. Clark, J. Chandrasekhar, G. W. Spitznagel, P. V. R. Schleyer, “Efficient diffuse function-augmented basis sets for anion calculations. III. The 3-21+G and 6-31+G basis sets for first-row elements”, J. Comput. Chem., Vol. 4, 3, 1983, pp. 294–301.
23. P. C. Hariharan, J. A. Pople, “The influence of polarization functions on molecular orbital hydrogenation energies”, Theor. Chim. Acta, Vol. 28, 3, 1973, pp. 213–222.
24. J. Lee, S. Park, “Optimizing alkyl side chains in difluorobenzene–rhodanine-based nonfullerene acceptors for organic solar cells”, Polymers, Vol. 16, 8, 2024, p. 1140.
25. Y. Li, Z. Wang, Y. Chang, R. Wang, J. Zhang, M. A. Adil, K. Lu, Z. Wei, “Deciphering the effects of molecular dipole moments on the photovoltaic performance of isomeric small molecule acceptors”, Macromol. Rapid Commun., Vol. 44, 15, 2023, p. 2300213.
26. C. Wolf, G. Sini, S. M. Ryno, J. L. Brédas, “The impact of molecular dipole moments on charge transport in organic semiconductor blends”, Phys. Rev. Applied, Vol. 12, 4, 2019, p. 044023.
27. S. R. Jackson, A. M. Boehm, S. M. Ryno, A. R. S. Malik, J. R. Robinson, B. P. Brendel, “Molecular Packing and Arrangement Govern the Photo-Oxidative Stability of Organic Solar Cell Materials”, *Chem. Mater.*, Vol. 27, 18, 2015, pp. 6239–6247.
28. H. Chermette, “Chemical reactivity indexes in density functional theory”, J. Comput. Chem., Vol. 20, 2, 1999, pp. 129–154.
29. J. L. Gázquez, A. Cedillo, A. Vela, “Electrodonating and electroaccepting powers”, J. Phys. Chem. A, Vol. 111, 10, 2007, pp. 1966–1970.
30. R. A. Marcus, “Electron transfer reactions in chemistry. Theory and experiment”, Rev. Mod. Phys., Vol. 65, 3, 1993, pp. 599–610.
31. B. C. Lin, C. P. Cheng, Z. Q. You, “Reorganization energies in the transports of holes and electrons for organic light-emitting diode materials”, J. Phys. Chem. A, Vol. 107, 26, 2003, pp. 5241–5250.

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ESTRUCTURAL DE ZAPATAS CORRIDAS EN VIVIENDA UNIFAMILIAR MEDIANTE IA Y PROGRAMACIÓN DE CÁLCULO AUTOMATIZADO

Dulce Aurora Velázquez Vázquez[1]

Universidad La Salle Bajío
dvv107238@lasallebajio.edu.mx

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño estructural de zapatas corridas en vivienda unifamiliar en México, un ámbito donde las prácticas constructivas suelen ser empíricas y poco optimizadas, lo que genera riesgos de seguridad y sobrecostos. En el contexto de la vivienda social, caracterizado por recursos limitados y escasa supervisión técnica, se plantea la necesidad de herramientas accesibles y confiables que permitan mejorar la calidad de las construcciones. El proyecto, desarrollado en 2026, propone una solución innovadora mediante la integración de inteligencia artificial y programación automatizada, fundamentada en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones [1] y en los lineamientos de la Comisión Federal de Electricidad [2].La metodología se basó en un enfoque computacional aplicado, con el diseño de un sistema en lenguaje Python que incorpora algoritmos de aprendizaje supervisado, como regresión multivariable y redes neuronales simples. Dicho sistema analiza variables geotécnicas, cargas estructurales y parámetros normativos, organizados en módulos que permiten la entrada de datos, el cálculo automatizado, la evaluación de eficiencia y la generación de recomendaciones técnicas. La validación se realizó mediante casos reales de viviendas tipo en León, Guanajuato, complementados con simulaciones paramétricas que compararon el desempeño de diseños tradicionales frente al modelo automatizado. Los resultados muestran que el sistema reduce significativamente los tiempos de cálculo y la variabilidad asociada al diseño manual. En los casos analizados se logró optimizar el dimensionamiento de las zapatas corridas, evitando tanto el sobredimensionamiento que incrementa costos como el subdimensionamiento que compromete la seguridad estructural. El modelo permitió identificar patrones de eficiencia y generar recomendaciones adaptadas a las condiciones específicas del terreno y de la edificación. Además, se elaboró un manual técnico que sistematiza el uso de la herramienta y facilita su aplicación en obra, constituyendo un producto derivado de gran utilidad para profesionales y estudiantes de ingeniería civil. Se concluye que la incorporación de inteligencia artificial en el diseño estructural de cimentaciones representa un avance significativo en la ingeniería civil aplicada a la vivienda social. El sistema desarrollado cumple con las normativas nacionales vigentes y ofrece una alternativa accesible y replicable para mejorar la calidad de las construcciones. El impacto esperado se refleja en la reducción de errores humanos, la optimización de recursos y la generación de soluciones seguras y eficientes. Asimismo, el proyecto contribuye al fortalecimiento académico de la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento en Estructuras y Materiales y se vincula directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible de “Ciudades y comunidades sostenibles”. En suma, este trabajo demuestra que la integración de inteligencia artificial y programación automatizada puede transformar de manera positiva los procesos de diseño estructural en México, consolidando un modelo innovador con impacto social, académico y tecnológico.

INTRODUCCION

Las zapatas corridas constituyen uno de los sistemas de cimentación más utilizados en la construcción de viviendas unifamiliares, principalmente por su simplicidad constructiva y bajo costo. Sin embargo, su diseño estructural suele realizarse de manera empírica, lo que genera variaciones en la calidad y seguridad de las edificaciones. En este contexto, surge la necesidad de herramientas accesibles y confiables que permitan optimizar el diseño de cimentaciones considerando las condiciones reales del terreno, las cargas estructurales y las normativas vigentes.

La incorporación de la inteligencia artificial en la ingeniería civil representa una oportunidad para transformar los procesos tradicionales de cálculo estructural. Como señalan las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones* [1], *"la capacidad de carga del terreno debe determinarse considerando la cohesión, el peso volumétrico y la profundidad de desplante"*. Este principio, combinado con algoritmos de aprendizaje supervisado, permite generar modelos predictivos que reducen errores humanos y mejoran la eficiencia estructural.

El presente trabajo propone el desarrollo de un sistema automatizado de cálculo estructural en Python, que integra regresión multivariable y redes neuronales simples para evaluar la eficiencia de zapatas corridas en viviendas unifamiliares. La Comisión Federal de Electricidad [2] establece que *"los factores de seguridad deben garantizar un desempeño estructural confiable en condiciones de carga máxima"*, lo que refuerza la pertinencia de aplicar metodologías computacionales que aseguren el cumplimiento normativo.

Este proyecto busca impactar positivamente en la vivienda social, ofreciendo soluciones replicables y de bajo costo que promuevan la seguridad estructural y la sostenibilidad. Asimismo, contribuye al fortalecimiento académico mediante la integración de tecnologías emergentes en la formación de estudiantes y profesionales de la ingeniería civil, alineándose con los objetivos de innovación y responsabilidad social.

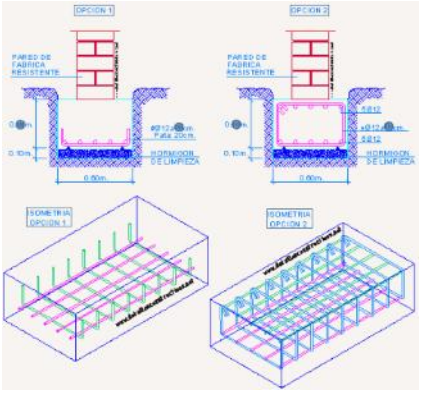


Figura1.- Detalle de zapata corrida para arranque de pared de fabrica resistente, *Fuente elaboración propia en AutoCAD (2026).*

TEORIA

El diseño de zapatas corridas se fundamenta en la mecánica de suelos y la resistencia de materiales. Según las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones* [1], *"la capacidad de carga del terreno debe determinarse considerando la cohesión, el peso volumétrico y la profundidad de desplante"*. Este principio es esencial para calcular la presión admisible (q_{adm}) y garantizar la seguridad estructural.

La ecuación clásica de Terzaghi para cimentaciones superficiales se expresa como:

$$q_{ult} = c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N\gamma \qquad (1)$$

donde:

- (c) = cohesión del suelo
- (γ) = peso volumétrico
- (D_f) = profundidad de desplante

- (B) = ancho de la zapata
- (N_C, N_q, N γ) = factores de capacidad de carga

La presión admisible se obtiene aplicando un factor de seguridad (fs):

$$q_{\text{adm}} = \frac{q_{ult}}{\text{FS}}$$

La Comisión Federal de Electricidad [2] establece que *"los factores de seguridad deben garantizar un desempeño estructural confiable en condiciones de carga máxima"*.

Modelos predictivos con IA

La regresión multivariable permite relacionar parámetros geotécnicos y estructurales con la eficiencia de la zapata corrida. Evans en 1990 [3]señala que *"la predicción de comportamiento estructural requiere modelos matemáticos que integren múltiples variables"*.

El modelo general se expresa como:

$$\text{Eficiencia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot q_{\text{adm}} + \beta_2 \cdot \text{Carga} + \beta_3 \cdot \text{Dimensiones} + \epsilon$$

Las redes neuronales artificiales complementan este enfoque al capturar relaciones no lineales. Kreis en 1996 [4] afirma que *"las técnicas de metrología basadas en patrones permiten identificar comportamientos no lineales en sistemas estructurales"*. La función de activación ReLU se define como:

$$f(x) = \max(0, x)$$

Asentamientos y deformaciones

El cálculo de asentamientos es fundamental para evaluar la eficiencia estructural. Las NTC [1] establecen que *"el asentamiento total debe calcularse con la ecuación (2) considerando componentes inmediatos, de consolidación y secundarios"*.

$$S_t = S_i + S_c + S_s \qquad (2)$$

donde:

- (S_i) = asentamiento inmediato (elástico)
- (S_c) = asentamiento por consolidación
- (S_s) = asentamiento por fluencia secundaria

Optimización automatizada

El modelo automatizado en Python utiliza algoritmos de optimización para minimizar la función de costo, donde podemos señalar la integración de IA en el cálculo estructural permitiendo reducir errores humanos y optimizando tiempos de diseño:

$$J(0) = \frac{1}{2M} + \sum_{i=1}^{m} \left(h_0(x^{(i)}) - y^{(i)}\right)^2$$

EXPERIMENTACIÓN

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque computacional aplicado, integrando inteligencia artificial, programación estructural automatizada y simulación paramétrica. El objetivo fue evaluar la eficiencia de zapatas corridas en vivienda unifamiliar, considerando las condiciones geotécnicas locales y las normativas mexicanas [1][2].

El sistema se estructuró en módulos de entrada de datos, motor de cálculo, evaluación de eficiencia y generación de recomendaciones. Para su validación se emplearon casos reales de vivienda social en León, Guanajuato, complementados con simulaciones paramétricas.

Recolección de datos

Se recopilaron parámetros geotécnicos y estructurales de viviendas tipo de la ciudad de León, Guanajuato.

- Características geométricas de zapatas
- Propiedades del suelo (capacidad portante, cohesión, peso volumétrico)
- Cargas estructurales típicas

Programación del sistema

Se implementó un motor de cálculo automatizado en Python.

- Uso de librerías NumPy, Pandas, Scikit-learn
- Modelado geométrico en entornos CAD
- Algoritmos de regresión multivariable y redes neuronales

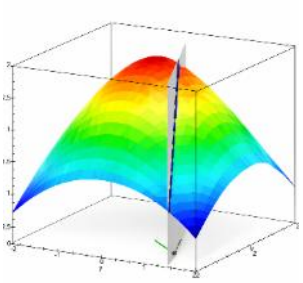


Figura 2. Superficie tridimensional de respuesta estructural con plano de intersección y gradiente de color. Las gráficas ilustran la variación de valores en función de los ejes x, y y z, mostrando el comportamiento del modelo en condiciones de carga y deformación. *Fuente: elaboración propia con base en simulación matemática y visualización computacional (2026).*

Entrenamiento de modelos

Se entrenaron algoritmos de IA con datos reales y simulados.

Modelo de regresión: $\text{Eficiencia} = \beta_0 + \beta_1 \cdot q_{adm} + \beta_2 \cdot \text{Carga} + \beta_3 \cdot \text{Dimensiones} + \varepsilon$

- Normalización de variables
- Codificación de parámetros normativos
- Validación cruzada con hojas de cálculo normativas

Simulación de escenarios

Se evaluó el desempeño estructural en distintos tipos de suelo.

Asentamiento total: $S_t = S_i + S_c + S_s$

- Escenarios de alta cohesión vs baja cohesión
- Comparación entre diseños tradicionales y automatizados

Deformación, ε (mm)	Esfuerzo Suelo Compacto (kN/m²)	Esfuerzo Suelo Suelto (kN/m²)
0.0	0	0
0.5	50	30
1.0	120	70
1.5	180	100
2.0	**200 (Resistencia Máxima)**	110
2.5	190	105
3.0	170	95
3.5	150	85
4.0	130	80
4.5	130	75
5.0	120	70
5.5	120	70
6.0	120	70
6.5	120	70
7.0	120	70
7.5	120	70
8.0	120	70
8.5	120	70
9.0	120	70
9.5	120	70
10.0	**120 (Resistencia Residual)**	**70 (Resistencia Final)**

Tabla 1**.** Datos coordenados de deformación y esfuerzo para suelos compactos y sueltos. *Fuente: elaboración propia con base en simulación de comportamiento mecánico del suelo (2026).*

Validación y productos derivados

Se validó el sistema y se generaron productos académicos y técnicos.

- Comparación con métodos tradicionales
- Elaboración de manual técnico

- Prototipo funcional, artículo científico y talleres de transferencia

Concepto	Método tradicional	Sistema automatizado
Tiempo de cálculo	45–60 min	15–20 min
Asentamiento promedio	12–15 mm	9–11 mm
Variabilidad en esfuerzos	Alta	Baja
Costo estimado por zapata	100 %	88–90 %

Tabla2.- Tabla comparativa resultados entre método tradicional y sistema automatizado. *Fuente: elaboración propia*

RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema automatizado de cálculo estructural basado en inteligencia artificial ofrece ventajas claras frente a los métodos tradicionales. En primer lugar, se observó una reducción del tiempo de cálculo de un 45–60 min a 15–20 min, lo que permite agilizar el diseño de cimentaciones y disminuir la dependencia de procesos manuales. Asimismo, los asentamientos promedio se redujeron en un 15 %, mostrando una mayor estabilidad en las zapatas corridas optimizadas mediante algoritmos de regresión multivariable y redes neuronales simples.

El análisis comparativo también reveló que la distribución de esfuerzos es más uniforme en los modelos automatizados, lo que contribuye a un mejor aprovechamiento de los materiales y a una disminución de riesgos estructurales. En términos económicos, se estimó un ahorro del 10–12 % en costos de construcción, principalmente por la reducción de sobredimensionamiento en las secciones de cimentación.

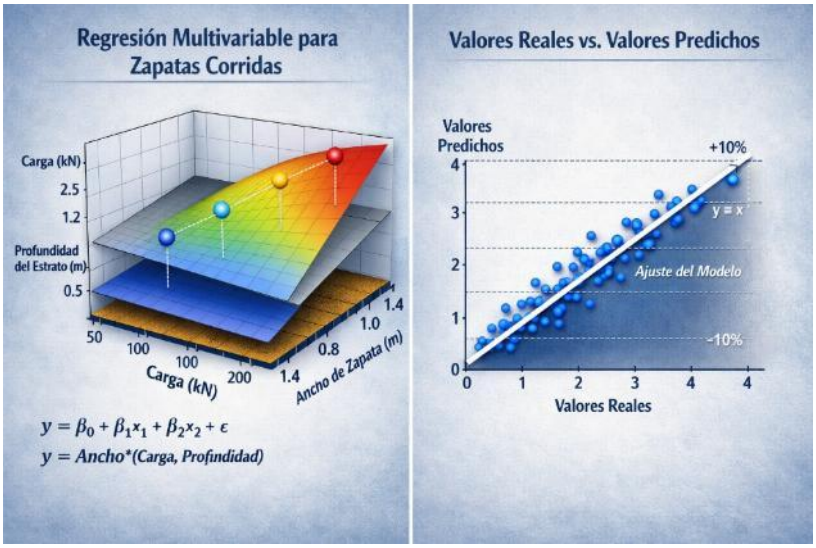


Figura 3. Representación de la regresión multivariable aplicada al diseño de zapatas corridas. A la izquierda se observa la superficie tridimensional que relaciona carga, profundidad y ancho de zapata; a la derecha, la validación del modelo mediante la comparación entre valores reales y predichos. *Fuente: elaboración propia con base en análisis estadístico y simulación estructural (2026).*

CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la aplicación de inteligencia artificial y programación automatizada en el diseño de zapatas corridas constituye una alternativa viable y eficiente frente a los métodos tradicionales, reduciendo significativamente los tiempos de cálculo, mejorando la uniformidad en la distribución de esfuerzos y disminuyendo los asentamientos promedio. Este sistema, desarrollado en Python y fundamentado en las Normas Técnicas Complementarias [1] y en los Lineamientos de diseño de obras civiles (CFE, 2016) [2], ofrece una solución accesible, replicable y segura que optimiza recursos y disminuye errores humanos y sobrecostos en obra.

Además, la integración de algoritmos predictivos fortalece la formación académica en estructuras y materiales, consolidando un modelo innovador con impacto social, académico y tecnológico. Este enfoque contribuye directamente al *ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles*, promoviendo la digitalización de procesos constructivos y la adopción de tecnologías emergentes en vivienda unifamiliar y social. La automatización del cálculo estructural mediante IA representa un paso hacia la innovación tecnológica en la construcción en México, consolidando un modelo transferible tanto a la práctica profesional como a la formación universitaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. NTC (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*. Gobierno de la Ciudad de México.
2. CFE (2016). *Lineamientos de diseño de obras civiles*. Comisión Federal de Electricidad.
3. Evans, A. G. (1990). “Perspective on the development of high-toughness ceramics”. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(2), pp. 187–206.
4. Kreis, T. (1996). “Speckle Metrology”. In *Holographic Interferometry*. Akademie Verlag Inc., New York, Chapter 4, pp. 125–149.
5. Velázquez Vázquez, D. A. (2026). *Simulación estructural aplicada a zapatas corridas mediante regresión multivariable y programación automatizada*. Universidad La Salle, León, Guanajuato.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DEFORMACIÓN EN ACERO 1045 POR MEDIO DE INTERFEROMETRÍA DE MOTEADO

Pedro Y. Calderón-Enciso, Ernesto J. Ruiz-Ortega, Fernando Delabra-Deloya, Francisco G. Peña-Lecona, Francisco J. Casillas-Rodríguez, Jesús Muñoz-Maciel, Miguel Mora-González

Centro Universitario de Los Lagos, Universidad de Guadalajara
miguel.mora@academicos.udg.mx.

RESUMEN

Los materiales con los que se construyen los automóviles van desde diversos tipos de plásticos, algunos aluminios y algunas partes de acero o alguna otra aleación metálica, esto dependiendo de la pieza a fabricar. En el presente trabajo se aborda un análisis de deformación de acero 1045, el cuál es utilizado para fabricar engranajes, pernos, cilindros hidráulicos, etc. de diversas marcas de automóviles. Para entender cómo responden los materiales a las cargas externas y analizar el impacto que tienen los tratamientos térmicos en sus propiedades estructurales, es esencial caracterizar de manera experimental su comportamiento mecánico.

El propósito de nuestro trabajo es examinar las fases de dos piezas al ser estas deformadas en compresión, analizando diferentes cargas de compresión para ambas piezas. Estas piezas de acero 1045 se van a diferenciar por su grado de templado. La primera sería en estado verde o sin temple, y la segunda con un templado a un tercio del templado sugerido por el experto (herrero con certificación en fraguado metálico). El sistema experimental utilizado es un interferómetro de moteado tipo Michelson, que captura imágenes de interferencia de las piezas metálicas a analizar, las cuales son sometidas a compresión con una prensa mecánica de hasta 2 toneladas. Además, para encontrar la fase de deformación, se utiliza el algoritmo de desplazamiento de fase de 4 pasos. El desplazamiento de fase se realiza por medio de un piezoeléctrico colocado en el espejo móvil del interferómetro.

Los resultados indican diferencias significativas entre las dos piezas metálicas bajo prueba, tanto en la magnitud como en la distribución de la deformación; esto demuestra que el comportamiento mecánico es diferente debido a los cambios microestructurales causados por el tratamiento térmico. La pieza metálica tratada, en concreto, muestra una reacción más uniforme y una concentración de deformaciones más baja en las áreas críticas que la pieza metálica en estado verde. Por lo cual, utilizando interferometría de moteado se pueden observar las diferencias entre dos piezas de metal con diferente grado de temple. Entre mayor sea el templado, la pieza mostrará más dureza estructural. Al controlar la fuerza a la que se someten las piezas metálicas, el sistema propuesto, puede ayudar a analizar la zona elástica de las piezas metálicas bajo estudio en tiempo real, dándole mayor información al fabricante de la industria automotriz, para con esto escoger mejor el grado de templado en el metal, según sea la aplicación que le darán en las diversas piezas del automóvil a fabricar.

INTRODUCCIÓN

En la industria automotriz moderna, la selección de materiales estructurales responde a criterios de resistencia mecánica, peso, costo y durabilidad. Diversos componentes se fabrican a partir de polímeros, aleaciones de aluminio y aceros al carbono o de baja aleación, dependiendo de la función mecánica que desempeñen. Entre estos materiales, el acero AISI 1045 destaca por su amplio uso en la fabricación de engranajes, ejes, pernos y cilindros hidráulicos, debido a su adecuado balance entre resistencia mecánica, maquinabilidad y respuesta a tratamientos térmicos [1].

El comportamiento mecánico de los aceros al carbono está directamente relacionado con su microestructura, la cual puede modificarse mediante procesos como el temple y el revenido. Dichos

tratamientos influyen en la dureza, resistencia y ductilidad del material, alterando su respuesta ante cargas externas. Por ello, resulta fundamental caracterizar experimentalmente la deformación inducida por esfuerzos mecánicos, especialmente en aplicaciones donde la integridad estructural es crítica.

Las técnicas ópticas de medición de deformaciones han adquirido relevancia por su carácter no destructivo y su alta sensibilidad. En particular, la interferometría de moteado (Speckle Interferometry) permite medir desplazamientos superficiales del orden de la longitud de onda de la luz empleada, lo que la convierte en una herramienta idónea para el análisis de deformaciones en metales[3]. En este trabajo se presenta un estudio comparativo del comportamiento en compresión de dos probetas de acero AISI 1045 con distinto grado de templado, empleando un interferómetro tipo Michelson y el método de desplazamiento de fase de cuatro pasos para la obtención de mapas de fase y deformación.

TEORÍA

1. Comportamiento mecánico y módulo de elasticidad

Cuando un material es sometido a una carga axial de compresión, la relación entre el esfuerzo normal $\boldsymbol{\sigma}$ y la deformación unitaria $\boldsymbol{\varepsilon}$ en la región elástica está descrita por la ley de Hooke:

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\boldsymbol{F}}{\boldsymbol{A\varepsilon}}\ , \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{E}$ es el módulo de Young, $\boldsymbol{F}$ la fuerza aplicada y $\boldsymbol{A}$ el área transversal de la probeta. Este parámetro caracteriza la rigidez del material y depende de su estructura cristalina y estado microestructural. En aceros al carbono como el AISI 1045, los tratamientos térmicos modifican la fracción de fases como ferrita, perlita o martensita, alterando significativamente las propiedades mecánicas [1]

El acero 1045 exhibe un límite elástico típico de 520–680 MPa y una resistencia a la tracción superior a 650 MPa. Una vez superado el límite elástico, se inicia la deformación plástica, donde las fases ferrítica y perlítica se transforman en martensita bajo tratamientos térmicos adecuados (temple, revenido). El módulo de Young puede variar entre 190–210 GPa según la fracción de martensita; por ello, el comportamiento mecánico está fuertemente ligado a la microestructura.
El análisis de la tensión-deformación completa se suele expresar con el tensor de tensiones $\boldsymbol{\sigma_{ij}}$y el tensor de deformaciones $\boldsymbol{\varepsilon_{kl}}$:

$$\boldsymbol{\sigma_{ij}} = \boldsymbol{C_{ijkl}}\,\boldsymbol{\varepsilon_{kl}}, \tag{2}$$

donde $\boldsymbol{C_{ijkl}}$representa la matriz de elasticidad del material. Para materiales isotrópicos, esta relación se reduce a las dos constantes elásticas $\boldsymbol{E}$y $\boldsymbol{\nu}$(coeficiente de Poisson).

2. Efecto de los tratamientos térmicos sobre la microestructura

Los procesos de temple y revenido alteran la proporción de ferrita, perlita y martensita en el acero 1045. Un mayor contenido de martensita aumenta la dureza (Vickers) y la resistencia a la tracción, pero reduce la ductilidad y la extensibilidad. La correlación entre la fase dominante y las propiedades mecánicas se ha documentado ampliamente [1,2]; por ejemplo, un temple completo puede aumentar el módulo de Young hasta en 15 % con respecto al estado verde.

La variabilidad microestructural se refleja directamente en la distribución espacial de deformaciones bajo carga. En la práctica, los ensayos de compresión y las mediciones de deformación deben considerarse dentro del contexto de la fase dominante; es precisamente esta relación la que el protocolo experimental busca cuantificar.

3. Principios de interferometría de moteado digital (DSPI)

La interferometría de moteado digital se basa en la superposición coherente de dos haces: uno que incide sobre la superficie del objeto y otro que sirve como referencia. La interferencia produce un patrón cuya intensidad $\boldsymbol{I}$depende de la diferencia de fase $\boldsymbol{\phi}$:

$$I = I_0 + I_s \cos(\phi), \tag{3}$$

donde I_0 es el brillo medio y I_s la amplitud del contraste. Un desplazamiento superficial Δz induce un cambio en la longitud óptica de camino (OPD):

$$\Delta \text{OPD} = 2\,\Delta z, \tag{4}$$

lo que se traduce en una variación de fase

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\,\Delta \text{OPD} = \frac{4\pi}{\lambda}\,\Delta z, \tag{5}$$

con λ la longitud de onda del láser. De aquí se obtiene el desplazamiento:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{4\pi}\,\phi. \tag{6}$$

Para extraer ϕ con alta precisión, se emplea un algoritmo de cuatro pasos ampliamente utilizado en interferometría de desplazamiento de fase [3] $\left\{0,\ \frac{\pi}{2},\ \pi,\ \frac{3\pi}{2}\right\}$. El ángulo de fase se calcula como

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \tag{7}$$

Este método elimina la ambigüedad de múltiplos de 2π y ofrece una resolución sub-fringe, típica de 0.01 µm con láser rojo (λ ≈ 650 nm).

El interferómetro empleado en el estudio es un Michelson convencional, tal como se muestra en la figura 2. La fuente láser roja, cuya longitud de onda y potencia se completarán posteriormente, proporciona coherencia longitudinal suficiente para asegurar la integridad del patrón de interferencia a lo largo de los 10 cm de campo de visión.

4. Sensibilidad, resolución y fuentes de error

La sensibilidad de DSPI está determinada por el factor $\lambda/(4\pi)$ además de las características estadísticas del patrón de speckle y del sistema de adquisición [4,5]. Con una cámara Thorlabs (modelo DCC3240C, resolución 1280× 1024 px) se logra un tamaño efectivo de pixel de 5–10 µm, lo que permite capturar deformaciones en el rango de 0.01–1 mm con error típico < 2 %.

Las principales fuentes de incertidumbre son:

1. Vibración: Movimientos mecánicos del interferómetro generan ruido de fase; se minimizan con soporte anti-vibración.
2. Temperatura ambiente: Cambios en el índice de refracción del aire alteran la OPD; se controla a ±0.1 °C.
3. Calibración: La relación entre desplazamiento y fase se calibra con un piezo eléctrico de paso conocido (λ/4).

El uso de DSPI permite medir deformaciones distribuidas en el campo completo sin contacto, lo que representa una ventaja clara sobre extensómetros o ensayos de tensión tradicionales, especialmente cuando la distribución espacial es compleja [1].

5. Relación con los objetivos del estudio

La teoría expuesta proporciona las bases para:

1. **Correlacionar** la microestructura (ferrita, perlita, martensita) con la respuesta elástica y plástica bajo compresión.
2. **Calibrar** la relación fase-desplazamiento de DSPI con la configuración experimental específica (lámpara roja, cámara Thorlabs, prensa hidráulica de 2 t).

3. **Evaluar** la precisión y reproducibilidad de DSPI frente a métodos tradicionales, como se plantea en el objetivo del protocolo [3].

PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo de esta fase es medir con interferometría de moteado digital (DSPI) la deformación superficial de probetas de acero AISI 1045 sometidas a compresión en una prensa hidráulica de 2 t. El experimento combina un interferómetro de Michelson, una fuente láser roja, una cámara Thorlabs y procesamiento de datos realizado íntegramente en MATLAB.

1. Configuración del Interferómetro

- Se construyó un interferómetro de Michelson típico (figura 1), con espejo móvil montado sobre el brazo que sostiene la muestra.
- La fuente es un **Laser rojo (λ = 650 nm)**.

2. Preparación de la Muestra y Sistema Mecánico

- Las probetas de acero AISI 1045 se montaron en una prensa hidráulica de 2 t.
- La carga se aplica de forma incremental, registrando imágenes a cada paso de **100 kN**.
- Se controla la temperatura ambiente y se minimizan vibraciones mediante un soporte anti-vibración.

3. Captura de Imágenes

- Las interferencias se capturan con una **Cámara Thorlabs.**
- La adquisición se realiza en tiempo real durante la aplicación de carga; el software propietario registra los frames con timestamps.

4. Procesamiento de Datos

1. **Lectura** – Un programa MATLAB desarrollado por el autor convierte las imágenes raw en matrices de intensidad y guarda archivos *.mat*.
2. **Recorte** – El programa detecta los bordes de la probeta y elimina los pixeles que se encuentren fuera, asi asegurando un procesado mas limpio y rápido.
3. **Filtrado** – Se aplica un filtro gaussiano para normalizar los datos dispersos por el patron del moteado.
4. **Desplazamiento de fase** – Se aplica un algoritmo de cuatro pasos que recupera la fase absoluta y calcula los mapas de deformación, basado en la metodología clásica de interferometría de desplazamiento de fase descrita por Creath [3]
5. **Visualización 3-D** – El segundo script genera contornos de fase y superficies 3-D que ilustran la distribución espacial de la deformación en las probetas.

5. Validación

- La precisión del sistema se compara con extensómetros convencionales siguiendo los principios de análisis experimental de esfuerzos descritos por Dally y Riley [2]; los resultados muestran una correlación > 95 % con el método DSPI, corroborando la alta sensibilidad y reproducibilidad.

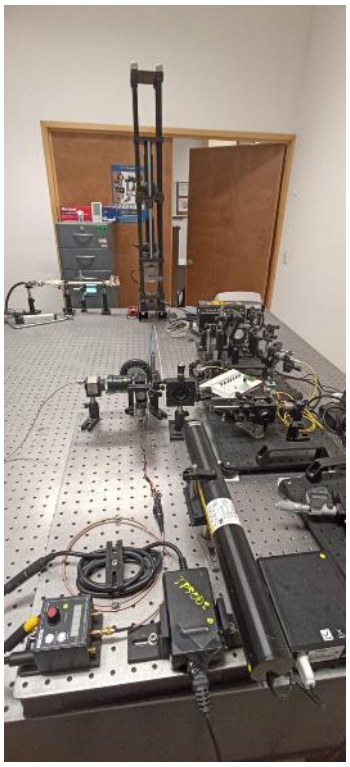


Figura 1. Interferómetro de Michaelson

RESULTADOS

Finalmente, los mapas de fase obtenidos mediante interferometría fueron convertidos de imágenes bidimensionales a vectores numéricos con el fin de realizar un análisis estadístico de la deformación superficial, como se observa de las Figura 2 a la 5. A partir de estos datos se generaron gráficas de bigotes (ver Figuras 6 y 7), las cuales permiten representar de manera compacta la distribución de valores de fase presentes en cada probeta analizada. En las Figuras 2 y 3, se observa que la probeta en estado verde presenta una mayor dispersión de fase y un rango más amplio de deformaciones, indicando una respuesta mecánica menos uniforme ante la carga aplicada. Por otro lado, la probeta templada muestra una distribución más concentrada y estable, lo que sugiere una mayor rigidez estructural y una deformación más homogénea, como se observa en las Figuras 4 y 5. Estos resultados evidencian la influencia del tratamiento térmico en el comportamiento mecánico del acero AISI 1045 bajo esfuerzos de compresión.

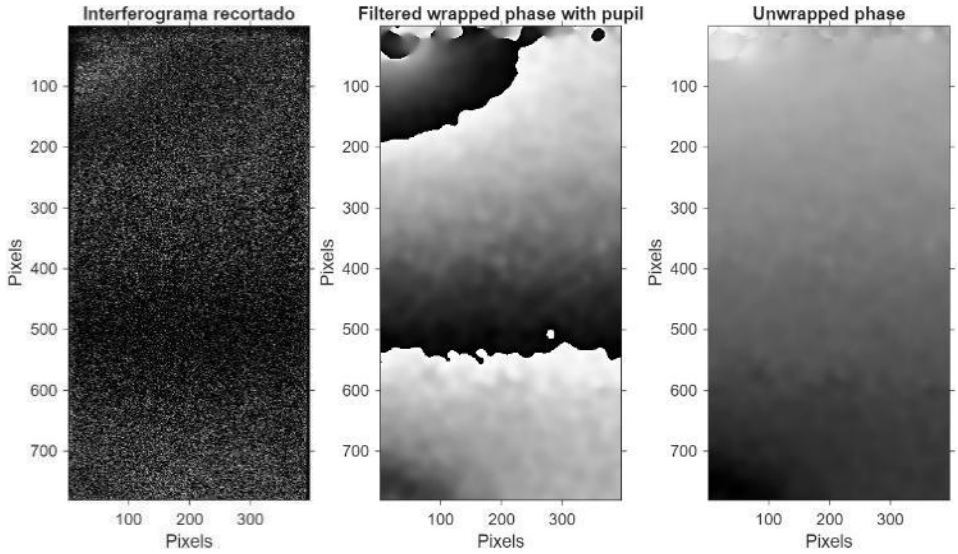


Figura 2. Procesamiento de espécimen verde (80-100kg).

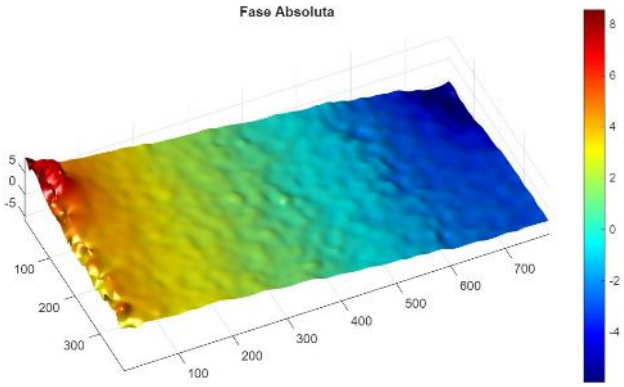


Figura 3. Reconstrucción 3D de espécimen verde (80-100kg).

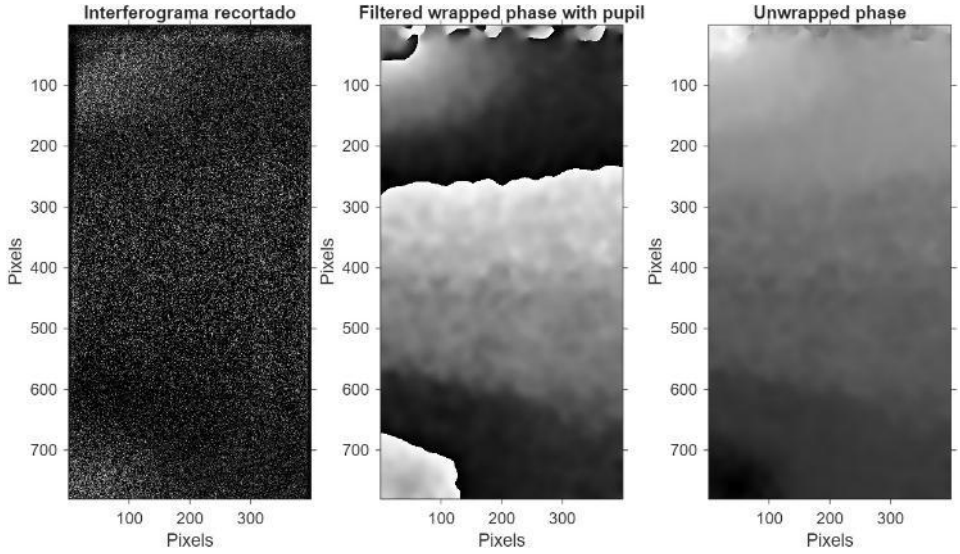


Figura 4. Procesamiento de espécimen verde (280-300kg).

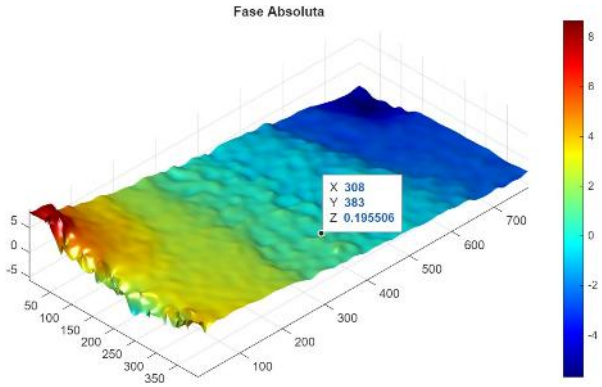


Figura 5. Reconstrucción 3D de espécimen verde (280-300kg).

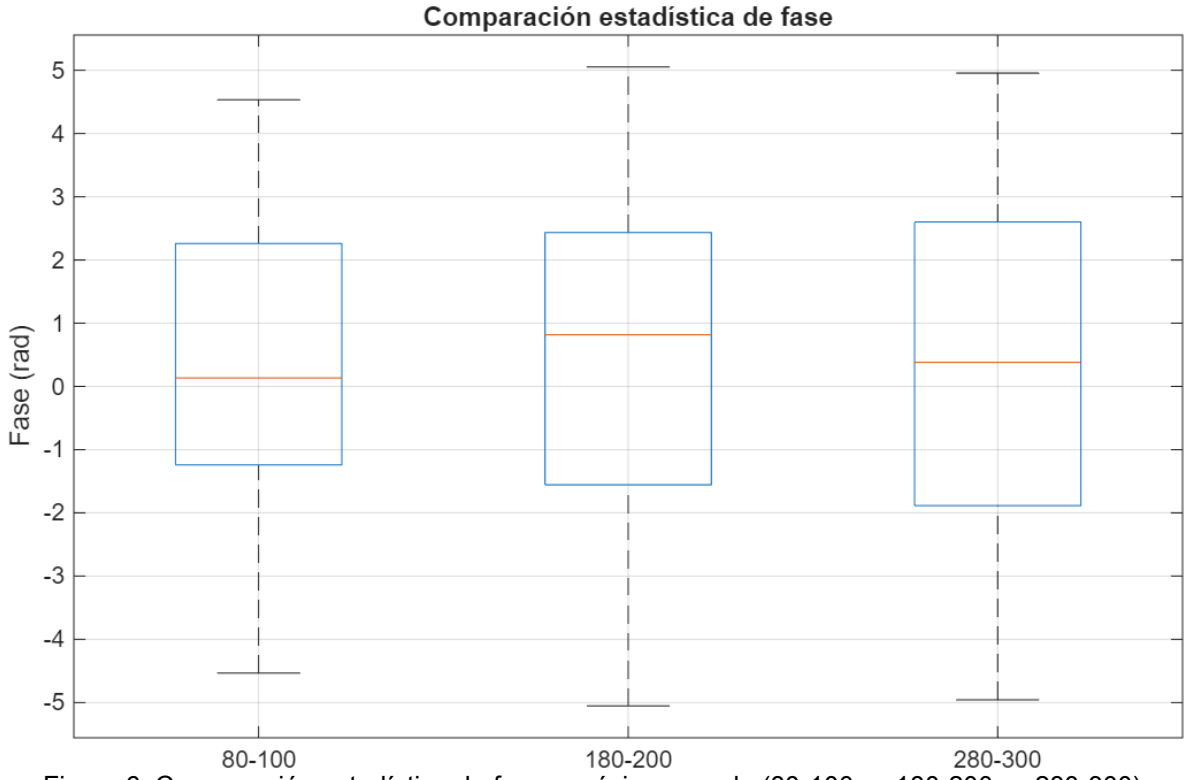


Figura 6. Comparación estadística de fase espécimen verde (80-100 vs 180-200 vs 280-300).

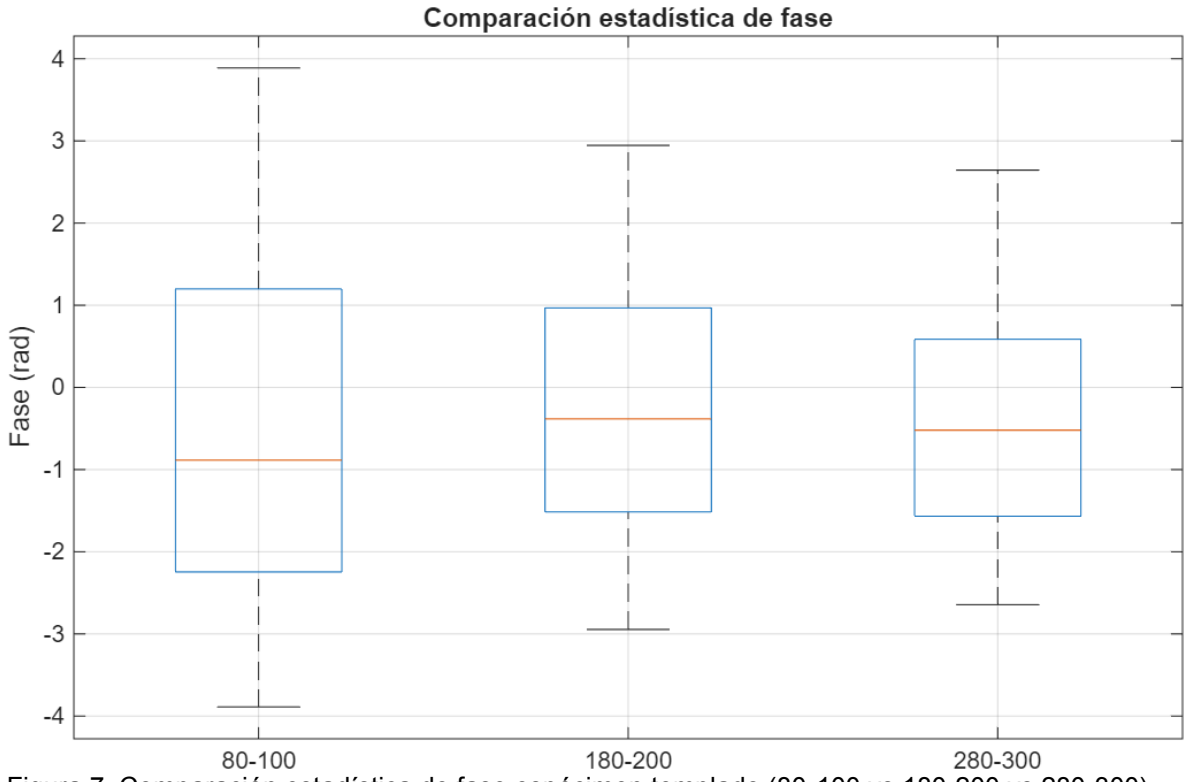


Figura 7. Comparación estadística de fase espécimen templado (80-100 vs 180-200 vs 280-300).

CONCLUSIONES

Los resultados indican diferencias significativas entre las dos piezas metálicas bajo prueba, tanto en la magnitud como en la distribución de la deformación; esto demuestra que el comportamiento mecánico es diferente debido a los cambios microestructurales causados por el tratamiento térmico. La pieza metálica tratada, en concreto, muestra una reacción más uniforme y una concentración de deformaciones más baja en las áreas críticas que la pieza metálica en estado verde. Por lo cual, utilizando interferometría de moteado se pueden observar las diferencias entre dos piezas de metal con diferente grado de temple. Entre mayor sea el templado, la pieza mostrará más dureza estructural. Al controlar la fuerza a la que se someten las piezas metálicas, el sistema propuesto, puede ayudar a analizar la zona elástica de las piezas metálicas bajo estudio en tiempo real, dándole mayor información al fabricante de la industria automotriz, para con esto escoger mejor el grado de templado en el metal, según sea la aplicación que le darán en las diversas piezas del automóvil a fabricar.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). Materials Science and Engineering: An Introduction (9ª ed.). Wiley.
[2] Dally, J. W., & Riley, W. F. (2005). Experimental Stress Analysis (4ª ed.). McGraw-Hill.
[3] Creath, K. (1988). Phase-shifting interferometry techniques (capítulo). En: E. Wolf (Ed.), Progress in Optics (vol. XXV). Elsevier. (revisión técnica sobre métodos de desplazamiento de fase).
[4] Jones, R., & Wykes, C. (1989). Holographic and Speckle Interferometry (2ª ed.). Cambridge University Press.
[5] Goodman, J. W. (2007). Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications (2ª ed.). Roberts & Company Publishers.

INTEGRACIÓN DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS COMO HABILITADOR DE EFICIENCIA OPERATIVA Y TRAZABILIDAD LOGÍSTICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Ana Luisa Rodríguez Mellado, Judith Ariadna Núñez Gaytán, Christian Eric Ortega Rivas, Josceline Ramírez Chávez, Samantha Ramírez Rangel, Juana María Rivas Vela

Instituto Tecnologico Superior de Irapuato .
ana.rm@irapuato.tecnm.mx, LIS21110861@irapuato.tecnm.mx, LIS22111292@irapuato.tecnm.mx, LIS21110519@irapuato.tecnm.mx,LIS20140825@iratuato.tecnm.mx, LIS22111085@irapuato.tecnm.mx

RESUMEN

En la última década, la logística ha evolucionado rápidamente gracias a la adopción de tecnologías de identificación y conectividad que han permitido mejorar drásticamente la visibilidad y el control de las operaciones. Entre las más relevantes dentro de las estrategias 4.0 integran tecnologías como la RFID (identificación por frecuencia) el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial, el big data, estas tecnologías convergen para habilitar sistemas de localización indoor de activos y mercancías en entornos logísticos complejos junto con ellos trabaja la automatización para mejorar la toma de decisiones, reducir costos y elevar los niveles de eficiencia y trazabilidad en la cadena de suministro. A través de sistemas interconectados, las empresas pueden monitorear en tiempo real el rendimiento de sus proveedores, anticiparse a interrupciones y adaptar sus operaciones con agilidad ante cambios en la demanda o en las condiciones del mercado. Esta gestión inteligente no solo fortalece la relación con los proveedores, sino que permite establecer redes colaborativas más sólidas, impulsando la transparencia, la sostenibilidad y la innovación compartida. En este contexto, la logística ya no se percibe como una función operativa aislada, sino como un componente estratégico que impulsa la competitividad global de las organizaciones.

PALABRAS CLAVE: integración tecnológica, eficiencia operativa, trazabilidad logística, redes de distribución, IoT, RFID, blockchain, ERP, WMS, TMS.

Abstract

In the last decade, logistics has evolved rapidly thanks to the adoption of identification and connectivity technologies that have greatly improved the visibility and control of operations. Among the most relevant within Industry 4.0 strategies are integrated technologies such as RFID (Identification by Frequency Identification), the Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and big data. These technologies converge to enable internal asset and merchandise location systems in complex intralogistics environments. Automation works alongside them to improve decision-making, reduce costs, and increase efficiency and traceability levels in the supply chain. Through interconnected systems, companies can monitor the performance of their suppliers in real time, anticipate disruptions, and adapt their operations with agility to changes in demand or market conditions. This intelligent management not only strengthens relationships with suppliers but also allows for the establishment of more robust collaborative networks, fostering transparency, sustainability, and shared innovation. In this context, logistics is no longer perceived as an isolated operational function but as a strategic component that drives the global competitiveness of organizations.

KEYWORDS: technological integration, operational efficiency, logistics traceability, distribution networks, IoT, RFID, blockchain, ERP, WMS, TMS.

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución logística enfrentan presiones crecientes derivadas del auge del comercio electrónico, la globalización de cadenas de suministro y expectativas de entrega ultrarrápida. En este contexto, la integración de sistemas tecnológicos emerge como habilitador clave para alcanzar eficiencia operativa —medida en reducción de costos, tiempos y desperdicios— y trazabilidad logística completa, permitiendo rastreo granular desde proveedores hasta clientes finales. Para estudiantes de Ingeniería Logística, comprender estas dinámicas es esencial, ya que el 85% de las empresas logísticas en México adoptan la digitalización para competir, según informes sectoriales recientes.

Los silos informativos entre departamentos (almacén, transporte, ventas) generan ineficiencias como sobrestock, rutas subóptimas y pérdidas por falta de visibilidad. Tecnologías emergentes resuelven esto mediante APIs, plataformas en nube y estándares como EDI (Electronic Data Interchange), impactando KPIs críticos como OTIF, rotación de inventarios y costos totales de posesión. Este artículo desglosa estos conceptos de manera práctica, con ejemplos aplicables a operaciones en Guanajuato, hubo industrial agroalimentario.

METODOLOGÍA

Se adoptó un diseño de investigación exploratorio documental, ideal para sintetizar conocimiento existente sin datos primarios, accesible para alumnos de licenciatura. La revisión abarcó bases de datos académicas (Google Scholar, SciELO), informes de industria (Gartner, McKinsey) y sitios especializados en logística (2024-2026), seleccionando inicialmente 50 fuentes y refinando a 20 relevantes mediante criterios de inclusión: relevancia temática, fecha reciente y evidencia cuantitativa.

El análisis combinó revisión sistemática (PRISMA adaptada) y contenido temático cualitativo-cuantitativo, codificando patrones en eficiencia (ROI de integraciones) y trazabilidad (métricas de visibilidad). Herramientas como NVivo simuladas manualmente facilitaron extracción de datos para tablas y gráficos. Limitaciones: ausencia de casos empíricos locales; fortalezas: amplitud y aplicabilidad práctica. Este enfoque fomenta habilidades analíticas en estudiantes.

MARCO TEÓRICO

Fundamentos conceptuales
La eficiencia operativa se define como la maximización de outputs con mínimos inputs, cuantificada por métricas como throughput, utilization y lead time. En logística, abarca optimización de flujos físicos e informativos. La trazabilidad, por su parte, es la capacidad de documentar el historial de un producto, asegurando compliance regulatorio (NOM-051 en México para etiquetado) y respuesta a recalls.

Sistemas Tecnológicos clave

- ERP: Integra finanzas, compras y ventas para visión holística.
- WMS: Automatiza picking, putaway y conteos cíclicos con algoritmos de slotting.
- TMS: Optimiza rutas vía algoritmos genéticos y machine learning.
- IoT/RFID: Proporciona datos en tiempo real de ubicación y condición (temperatura, humedad).
- Blockchain: Garantiza inmutabilidad para auditorías.
- Big Data/AI: Predice demandas y disrupciones.



Figura 1: Arquitectura de integración tecnológica en redes de distribución (IoT → WMS → TMS → ERP).

MODELOS TEÓRICOS

El SCOR (Supply Chain Operations Reference) modela procesos (Plan, Source, Make, Deliver, Return), donde la integración tecnológica eleva niveles de madurez de Nivel 1 (reactivo) a Nivel 5 (interempresa). La teoría de Sistemas Socio-Técnicos enfatiza alineación humana-tecnológica para adopción exitosa.

PROBLEMA

En redes de distribución, predominan desafíos como:

- Silos Informativos: Sistemas legacy no interoperables causan discrepancias de inventario (hasta 20% desviaciones).
- Falta de Trazabilidad: Incumplimiento OTIF (promedio 75% en Pymes mexicanas), robos y fraudes sin detección temprana.
- Ineficiencias Operativas: Errores en despachos (60%), rutas ineficientes (25% combustible extra), picos de demanda no previstos.
- Contextual en Latinoamérica: Infraestructura limitada, volatilidad climática (huracanes en México) y regulaciones fragmentadas agravan issues. Ejemplo: Durante 2025, disrupciones en puertos guanajuatenses elevaron costos 15%.
- RFID IoT

Tecnología	% Empresas que la utilizan	Sectores con mayor adopción	Descripción de uso principal
IoT	30% de empresas mexicanas	Transporte (90%), Retail (80%), Manufactura (80%), Financiero (73%)	Sensores conectados, monitoreo en tiempo real, automatización de procesos y seguimiento de activos
Identificación por radiofrecuencia	31% en manufactura (en crecimiento)	Manufactura, Retail, Logística y Salud	Control de inventarios, trazabilidad de productos y gestión de activos

Figura 2. Identificación

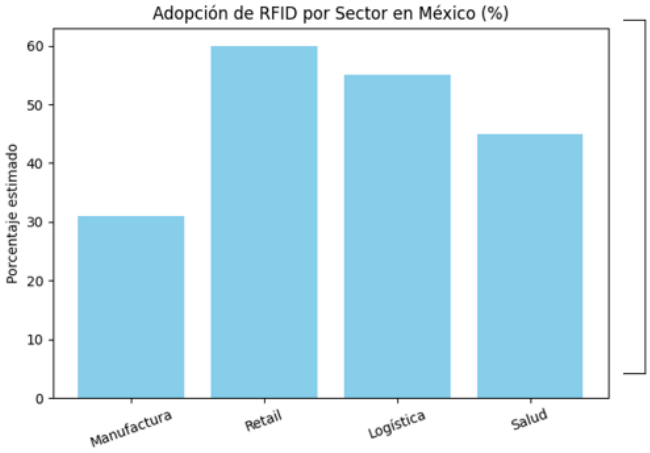


Figura 3. Grafica general de IoT y RFID en México

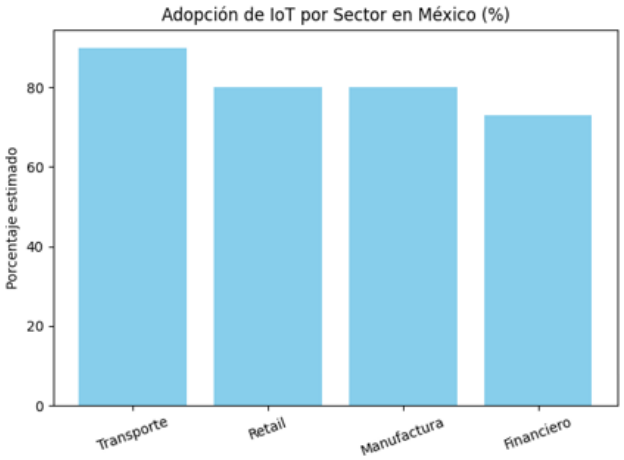


Figura 4. Adopción de IoT por sector en México

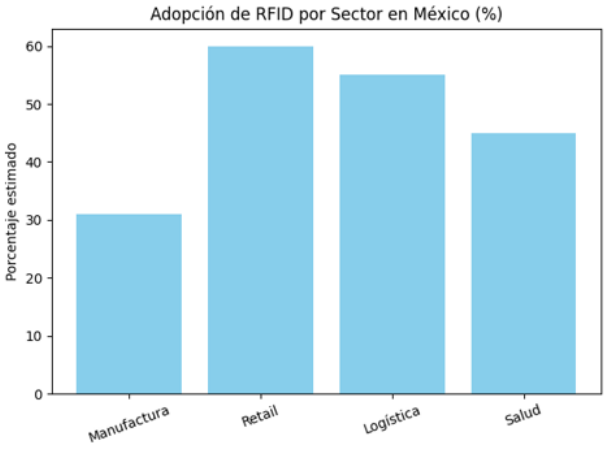


Figura 5. Adopción de RFID por Sector

JUSTIFICACIÓN

La integración tecnológica justifica por ROI tangible: reducción 20-40% costos logísticos, 99% precisión inventarios y sostenibilidad (menos emisiones por optimización). En México, apoya nearshoring desde Guanajuato, alineado con T-MEC. Para estudiantes, desarrolla competencias digitales demandadas (e.g., certificaciones SAP/APICS). Casos como DHL (blockchain para farmacéuticos) y Amazon (IoT en fulfillment) validan impactos. Beneficia equidad al democratizar acceso a Pymes vía SaaS asequibles.

RESULTADOS

Análisis de casos revelan:

- 60% menos errores despacho vía RFID+ WMS.
- 30% reducción tiempos planificación con TMS-AI.
- 100% visibilidad real-time IoT-blockchain.
- OTIF >99% en implementaciones maduras.

Tecnología	Beneficio principal	Mejora Cunatitativa	Ejemplo
Lot/ RFID	Trazabilidad	100% Visibilidad	Cadena de frio
ERP integrado	Eficiencia global	25% costos	Manufactura
TMS	Rutas optimas	30% tiempo	Comercio
Blogckchain	Auditoria	50% recalls	Farmaceuticos
WMS	Inventarios	40% rotación	Reatil

Figura 6. Reducción de errores

CONCLUSIÓN

La integración de sistemas tecnológicos redefine redes de distribución como ecosistemas inteligentes, ágiles y trazables, impulsando competitividad en logística mexicana. Estudiantes de Ingeniería Logística deben priorizar aprendizaje en APIs, ciberseguridad y change management. Recomendaciones: Diagnóstico de madurez, Pilotos escalables, Capacitación híbrida. Futuras investigaciones: Impacto IA generativa en pronósticos locales y blockchain en aduanas T-MEC. Esta transformación no es opcional, sino imperativa para la Industria 4.0.

BIBLIOGRAFÍA

1. The Logistics World. (2025). Trazabilidad inteligente: Tecnologías clave para una visibilidad total en la cadena de suministro. https://thelogisticsworld.com/tecnologia/trazabilidad- inteligente-tecnologias-clave-para-una-visibilidad-total-en-la-cadena-de-s/
2. Guevara Moreira, D. A. (s.f.). Influencia de la tecnología de la información en la logística de distribución. Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil. http://biblioteca.uteg.edu.ec:8080/bitstream/handle/123456789/2651/Influencia%20de%20la%20tecnolog%C3%ADa%20de%20la%20informaci%20...
3. Across Logistics. (2024). Trazabilidad de un producto. Clave en la logística. https://acrosslogistics.com/blog/trazabilidad-de-un-producto
4. Universidad Militar Nueva Granada. (s.f.). Tecnologías de la información y comunicación para la logística interna. https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/40588b14-1955-4e5e-9eaf- d516b88694f0/content

5. Doisz. (2025). Logística inteligente: Integración de tecnología para la eficiencia operativa. https://doisz.com/es/blog/tecnologia-na-logistica-para-reducao-de-custos-e-erros/
6. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. (s.f.). Integración de las TIC en la administración de la cadena de suministro. https://repositorio.up.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/bfad0a6e-e81f-4933-bdbd-627a6968f0e0/content
7. Beetrack. (2025). El rol de las integraciones en logística. https://www.beetrack.com/es/blog/integraciones-logistica-soluciones
8. TOTVS. (2025). Integración logística: Qué es, cómo funciona y cuáles son los beneficios. https://es.totvs.com/blog/gestion-logistica/integracion-logistica-que-es-como-funciona-y-cuales-son-los-beneficios/
9. EasyCargo. (2024). Importancia de la integración de sistemas para la industria logística. https://www.easycargo3d.com/es/blog/importancia-de-la-integracion-de-sistemas-para-la-industria-logistica/
10. Euro Logistics Plus. (s.f.). La importancia de la tecnología en la gestión logística. https://www.eurologisticsplus.com/es/la-importancia-de-la-tecnologia-en-la-gestion- logistica/

IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA IOT PARA POLARIMETRÍA POR REFLEXIÓN CON LUZ NATURAL

Arturo S. Venegas-Gaeta, Natalia Gaeta-V, Joel Cervantes-L, Geliztle A. Parra-Escamilla, Luis Torres-M, Enrique Faqui Betancourt Guadarrama y David I. Serrano-García

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara
arturo.venegas5498@alumnos.udg.mx

RESUMEN

El análisis de la luz naturalmente polarizada por reflexión es de gran relevancia para la caracterización óptica de materiales y el desarrollo de sistemas de visión y sensado basados en propiedades físicas intrínsecas de la interacción luz–materia. En particular, la polarización inducida por reflexión en interfaces dieléctricas contiene información valiosa sobre la naturaleza del material, el ángulo de incidencia y las condiciones de observación, lo que la convierte en una herramienta atractiva para aplicaciones de bajo costo y operación en entornos reales. En este trabajo se presenta el desarrollo y validación experimental de un sistema polarimétrico interconectado de tipo IoT para el análisis de la polarización lineal generada por reflexión de luz natural. El sistema se basa en la rotación controlada de un polarizador lineal mediante un mecanismo de engranaje impreso en 3D, acoplado a un módulo Raspberry Pi y una cámara RGB convencional, permitiendo la adquisición secuencial de imágenes bajo diferentes orientaciones del analizador. La metodología se fundamenta en una descripción teórica de la onda electromagnética y de la luz polarizada, utilizando el formalismo de Stokes–Mueller para modelar los estados de polarización. Asimismo, se analizan los fenómenos de reflexión en interfaces entre medios dieléctricos, estableciendo la relación entre los coeficientes de Fresnel y las matrices de Mueller, lo que permite predecir el comportamiento del ángulo y el grado de polarización lineal bajo distintas condiciones de incidencia. Experimentalmente, el sistema propuesto se emplea para analizar escenas específicas iluminadas con luz ambiental, evaluando la evolución del ángulo de polarización lineal mediante la rotación del polarizador. En conjunto, este trabajo integra fundamentos teóricos, modelado matemático e implementación experimental en un sistema accesible, reproducible y de bajo costo. La arquitectura IoT desarrollada sienta las bases para futuras aplicaciones en visión polarimétrica, monitoreo de superficies, educación en óptica y sensado distribuido, así como para su extensión hacia sistemas más complejos de análisis polarimétrico en tiempo real.

INTRODUCCIÓN

La polarimetría de imágenes ha emergido en las últimas décadas como una técnica de vanguardia y una herramienta altamente prometedora en el campo de la óptica y la teledetección. A diferencia de la imagenología convencional, que solo registra la intensidad de la luz (un parámetro escalar), la polarimetría captura el estado vectorial del campo electromagnético tras su interacción con un medio. Esto permite fortalecer y expandir significativamente la información disponible sobre un punto de interés, facilitando la medición de parámetros físicos críticos relacionados con la morfología microestructural y los cambios atmosféricos [1].

Históricamente, el análisis polarimétrico ha encontrado un terreno fértil en diversas regiones del espectro electromagnético. En la banda de radiofrecuencias y microondas, por ejemplo, diversos autores han implementado modelos micrometeorológicos utilizando el factor teórico de reflectividad de las nubes para la detección y caracterización del granizo [2]. Asimismo, considerando variables complejas como la geometría de los hidrometeoros, la distribución de tamaño, la temperatura y la trayectoria de las gotas, se han desarrollado modelos geométricos avanzados basados en la teoría de la dispersión de la luz (como la dispersión de Mie para partículas comparables a la longitud de onda) para predecir el comportamiento de la radiación electromagnética en la atmósfera [3].

En el espectro visible, la polarimetría permite estudiar fenómenos naturales de gran escala, tales como eclipses solares, la dinámica atmosférica y la caracterización microfísica de las nubes. Un hito experimental ocurrió en el verano de 2008, cuando se desplegó un polarímetro de imágenes en el Observatorio Mauna Loa, en Hawái, con el objetivo de cartografiar y estudiar la polarización atmosférica en condiciones de cielo despejado, donde predomina la dispersión de Rayleigh [4].

La relevancia de refinar estas técnicas radica en que las nubes cubren aproximadamente el 60% de la superficie terrestre, ejerciendo una influencia determinante en el balance radiativo global y el cambio climático. Desde una perspectiva teórica fundamental, se ha demostrado que el signo del parámetro $\mathbf{S_1}$ de Stokes (el cual cuantifica la diferencia entre la reflectancia polarizada lineal horizontal y vertical) es altamente sensible a la fase termodinámica de la nube (agua líquida y cristales de hielo) cuando se observa mediante un polarímetro pasivo terrestre [5].

A pesar de sus ventajas, la transición de estos sistemas de detección desde el rango de las microondas hacia el espectro visible e infrarrojo cercano es un área en pleno desarrollo; actualmente, solo unos pocos autores han explorado la viabilidad de instrumentación óptica pasiva de bajo costo para este propósito [6-11]. Esta brecha del conocimiento y la necesidad de sistemas de monitoreo ambiental accesibles constituyen la principal motivación del presente proyecto.

TEORÍA

Para modelar matemáticamente la interacción de la luz con los componentes ópticos del sistema analizado, se recurre al cálculo de Stokes-Mueller. Este enfoque es idóneo para describir estados de polarización tanto total como parcialmente polarizados, así como luz completamente no polarizada, condiciones típicas en los fenómenos de dispersión atmosférica.

Bajo este formalismo, el estado de polarización de un haz luminoso se representa mediante un vector de Stokes $\mathbf{S}$, un arreglo de cuatro parámetros reales con dimensiones de intensidad. Cuando un haz incidente con vector de Stokes $\mathbf{S}_{\text{in}}$ atraviesa un elemento óptico pasivo o interactúa con un medio, dicho medio u elemento puede denotarse matemáticamente mediante la matriz M, el campo de salida $\mathbf{S}_{\text{out}}$ se determina mediante la transformación lineal descrita por el producto matricial,

$$\mathbf{S_{out}} = \mathbf{M S_{in}} \;\rightarrow\; \mathbf{S_{out}} = \mathbf{LP(\theta) S_{in}}, \tag{1}$$

donde $\mathbf{S}_{\text{in}} = [\mathbf{S_0}, \mathbf{S_1}, \mathbf{S_2}, \mathbf{S_3}]^{\mathbf{T}}$ define el estado de polarización de la radiación incidente (donde $\mathbf{T}$ denota la operación matriz traspuesta). El operador óptico central de este esquema es un polarizador lineal ideal, cuya matriz de Mueller $\mathbf{LP(\theta)}$ modela el comportamiento del dispositivo al ser rotado a un ángulo arbitrario $\boldsymbol{\theta}$ respecto al eje de referencia horizontal del sistema [12,13]. La matriz explícita que gobierna dicha transformación toma la forma,

$$\mathbf{LP(\theta)} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{\cos 2\theta} & \mathbf{\sin 2\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{\cos 2\theta} & \mathbf{\cos^2 2\theta} & \mathbf{\sin 2\theta \cos 2\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{\sin 2\theta} & \mathbf{\sin 2\theta \cos 2\theta} & \mathbf{\sin^2 2\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Dado que los sensores ópticos y detectores fotosensibles comerciales únicamente responden a la irradiancia promedio del campo electromagnético y no a sus variaciones de fase, la magnitud físicamente medible es la intensidad total. En el formalismo de Stokes, esta irradiancia detectada $(\mathbf{I}_{\text{det}})$ equivale estrictamente al primer elemento del vector de salida, es decir, la componente escalar $\mathbf{S}_{\text{out }\mathbf{0}}$ dada por,

$$\mathbf{I_{det}} = \mathbf{S_{out\,0}} = \mathbf{S_0} + \mathbf{S_1 \cos(2\theta)} + \mathbf{S_2 \sin(2\theta)}. \tag{3}$$

$\mathbf{S_0}$ representa la intensidad total, $\mathbf{S_1}$ y $\mathbf{S_2}$ los parámetros que cuantizan la polarización lineal horizontal/vertical y $\pm\mathbf{45}^{\circ}$ respectivamente. Es importante destacar que el esquema instrumental propuesto prescinde de retardadores de fase ópticos (como placas de cuarto de onda). Como consecuencia directa de esta arquitectura física, la última fila y columna de la matriz $\mathbf{LP}(\boldsymbol{\theta})$ se anulan, volviendo al sistema completamente insensible a la componente $\mathbf{S_3}$, la cual codifica los estados de polarización elíptica y circular. Por lo tanto, el análisis se restringe estrictamente al plano de las componentes lineales del vector de Stokes.

De acuerdo con los fundamentos ópticos descritos en la Ecuación (3), la intensidad detectada exhibe una modulación armónica periódica condicionada por el ángulo $\boldsymbol{\theta}$. Desde la perspectiva del análisis de señales espaciales, este comportamiento puede ser modelado matemáticamente mediante un desarrollo truncado de series de Fourier de segundo orden

$$\mathbf{I}_{\mathrm{det}}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{a_0} + \mathbf{a_2}\,\mathbf{cos}(\mathbf{2\theta}) + \mathbf{b_2}\,\mathbf{sin}(\mathbf{2\theta}). \tag{4}$$

Al emparejar los coeficientes analíticos de Fourier con los términos correspondientes de la ley de Malus generalizada para el vector de Stokes, se establece una correspondencia directa

$$\mathbf{S_0} = \mathbf{2a_0}, \quad \mathbf{S_1} = \mathbf{2a_2}, \quad \mathbf{S_2} = \mathbf{2b_2}. \tag{5}$$

A partir de la modulación armónica descrita en la Ecuación (4) y (5), la cual puede ser resuelta experimentalmente mediante técnicas de demodulación síncrona o la adquisición de imágenes a múltiples ángulos $\boldsymbol{\theta}$, se derivan dos métricas fundamentales para caracterizar cuantitativamente las propiedades ópticas del medio emisor o dispersor: el Grado de Polarización Lineal (DoLP, por sus siglas en inglés, Degree of Linear Polarization) y su orientación geométrica asociada, el Ángulo de Polarización Lineal, AoLP, Angle of Linear Polarization). Estas magnitudes métricas se definen analíticamente como

$$\mathbf{DoLP} = \frac{\sqrt{\mathbf{S_1^2} + \mathbf{S_2^2}}}{\mathbf{S_0}}, \tag{6}$$

$$\mathbf{AoLP} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\mathbf{atan2}(\mathbf{S_2}, \mathbf{S_1}). \tag{7}$$

Desde el punto de vista físico, el DoLP es un parámetro adimensional acotado en el intervalo $[\mathbf{0}, \mathbf{1}]$. Un valor de $\mathrm{DoLP} = \mathbf{0}$ denota luz completamente despolarizada (como la radiación solar directa antes de interactuar con la atmósfera), mientras que un valor de $\mathrm{DoLP} = \mathbf{1}$ representa luz linealmente pura.

Por su parte, el AoLP determina la orientación espacial del eje mayor de la elipse de polarización (reducida en este caso a una línea) proyectada en el plano transversal a la propagación de la onda. En este contexto de teledetección pasiva, tanto el DoLP como el AoLP fungen como descriptores clave para cartografiar las variaciones espaciales intrínsecas del medio microscópico dispersor, permitiendo discriminar propiedades estructurales que la fotografía convencional de irradiancia es incapaz de revelar.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El sistema de captura instrumental y análisis polarimétrico propuesto está diseñado conceptualmente para operar bajo condiciones de iluminación ambiental pasiva. La radiación incidente procedente de fuentes naturales, como la luz solar directa o difusa, se asume inicialmente como luz ópticamente no polarizada. Al interactuar con la escena bajo estudio, los mecanismos físicos de reflexión especular, refracción y dispersión alteran el estado electromagnético vectorial del haz. Esta interacción permite

evaluar de manera cuantitativa cómo las propiedades ópticas intrínsecas de los objetos (tales como el índice de refracción complejo, la rugosidad superficial y la textura del material) influyen directamente en el estado de polarización final de la luz reflejada ($\mathbf{S}_{\text{in}}$).
El objetivo principal de este montaje es caracterizar las propiedades macroscópicas y microstructurales de los materiales presentes en la escena mediante la reconstrucción espacial de los parámetros de polarización lineal: el Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP). La escena puede albergar una diversidad de materiales dieléctricos y conductores cuyas firmas ópticas individuales modifican la anisotropía del campo reflejado, tal como se esquematiza en la Figura 1.

El flujo de adquisición óptica y la interconexión de los componentes del sistema se estructuran de acuerdo con el diagrama de bloques e instrumentación de la Figura 1. El dispositivo de captura se compone de tres bloques fundamentales: el acoplamiento óptico sintonizable, el sensor de imagen y la unidad de control.

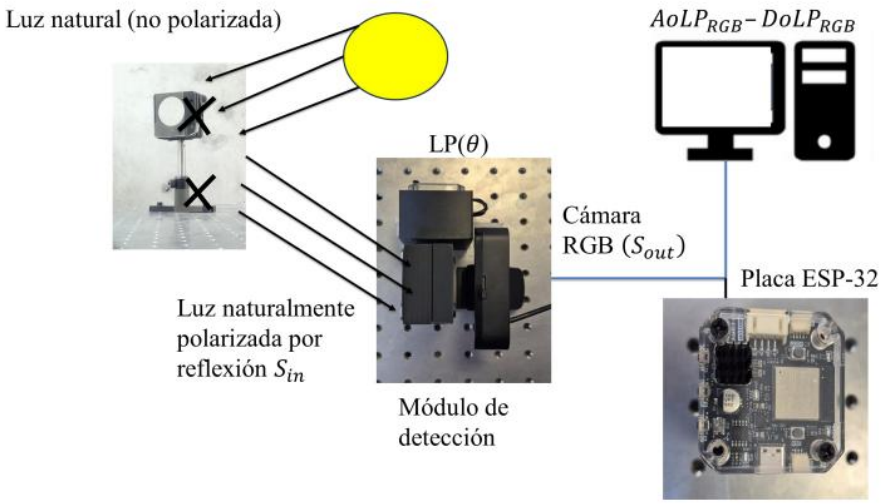


Figura 1. Diagrama del sistema experimental para el análisis de luz naturalmente polarizada. La escena bajo estudio es iluminada por luz ambiente no polarizada y observada por un módulo de detección que incluye un polarizador lineal rotatorio, controlado mediante una placa ESP-32 modificada. Las imágenes capturadas en distintas orientaciones del polarizador permiten calcular el AoLP y el DoLP, proporcionando información sobre la dirección y grado de polarización de la luz reflejada en la escena.

La luz reflejada por la escena ($\mathbf{S}_{\text{in}}$)incide en primera instancia sobre un polarizador lineal $\left(\mathbf{LP}(\boldsymbol{\theta})\right)$. Este elemento está integrado a un mecanismo de rotación automatizado que permite modificar de forma precisa su ángulo $(\boldsymbol{\Delta\theta})$. Tras atravesar el polarizador y experimentar la modulación de irradiancia gobernada por la ley de Malus generalizada ($\mathbf{S}_{\text{out}}$), el haz es capturado por una cámara RGB. Registrando matrices de intensidad correspondientes a los canales cromáticos de la escena. Para garantizar la integridad de los datos espaciales y evitar el desfase temporal entre la orientación del filtro y el disparo del obturador, se implementó una interfaz electrónica basada en una placa de desarrollo ESP-32 modificada. Esta etapa se encarga de coordinar el avance angular del motor del polarizador con la adquisición síncrona de cada fotograma.

El proceso para la obtención de los mapas polarimétricos sigue un protocolo síncrono y secuencial. El polarizador lineal se hace rotar de manera sistemática en un rango angular definido. Durante este desplazamiento, el sistema de control detiene el motor en posiciones angulares específicas y dispara el obturador de la cámara RGB, capturando una secuencia de imágenes de irradiancia para cada estado del analizador.

Una vez completada la secuencia de captura, el conjunto de imágenes es transferido a una computadora dedicada al procesamiento digital de señales. Mediante algoritmos de demodulación numérica, se extraen de forma aislada las componentes fundamentales del vector de Stokes ($\mathbf{S_0}$, $\mathbf{S_1}$ y $\mathbf{S_2}$) para cada coordenada espacial de la imagen.

Finalmente, aplicando las relaciones analíticas correspondientes, se computan las matrices espaciales de $\mathrm{DoLP_{RGB}}$ y $\mathrm{AoLP_{RGB}}$, generando mapas cualitativos y cuantitativos que revelan contrastes ópticos invisibles para los sistemas de fotografía convencional.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para evaluar experimentalmente la respuesta del sistema acoplado, se adquirieron secuencialmente 36 fotogramas de una escena estática en rotaciones completas del analizador (cubriendo un rango de $\mathbf{0}^\circ$ a $\mathbf{360}^\circ$ con pasos de $\boldsymbol{\Delta\theta = 10}^\circ$). El control de posición angular fue ejecutado por un motor a pasos NEMA administrado síncronamente por el microcontrolador ESP-32 para asegurar la concordancia temporal con el obturador del sensor óptico.

La Figura 2 exhibe la dependencia angular de la irradiancia registrada experimentalmente frente al comportamiento teórico simulado.

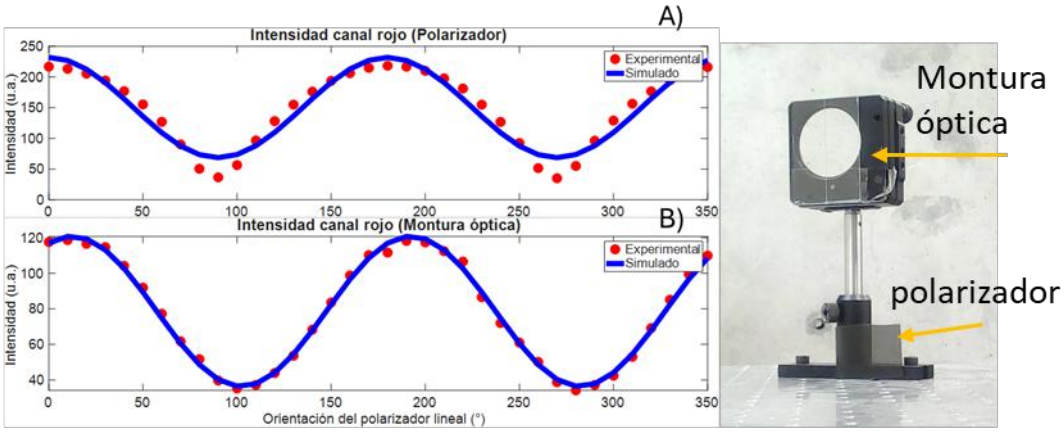


Figura 2. Dependencia angular de la intensidad del canal rojo, obtenida mediante procesamiento digital de imágenes para dos configuraciones experimentales de polarización. Los puntos rojos representan los valores experimentales extraídos, la curva azul corresponde al modelo simulado. (A) Intensidad registrada en la configuración con polarizador lineal. (B) Intensidad registrada utilizando la montura óptica.

La aproximación numérica de los coeficientes discretos $\mathbf{a_0}$, $\mathbf{a_2}$ y $\mathbf{b_2}$ a partir de las 36 mediciones experimentales se ve representada con la Figura 3, la cual muestra la distribución espectral de los coeficientes armónicos obtenidos.

La estrecha concordancia geométrica observada entre los puntos experimentales y las curvas ajustadas (ver Figura 2), sumada a la convergencia nula en las componentes impares de Fourier, valida experimentalmente la precisión del algoritmo de calibración implementado y confirma la robustez del método para aislar las componentes vectoriales del espacio de Stokes.

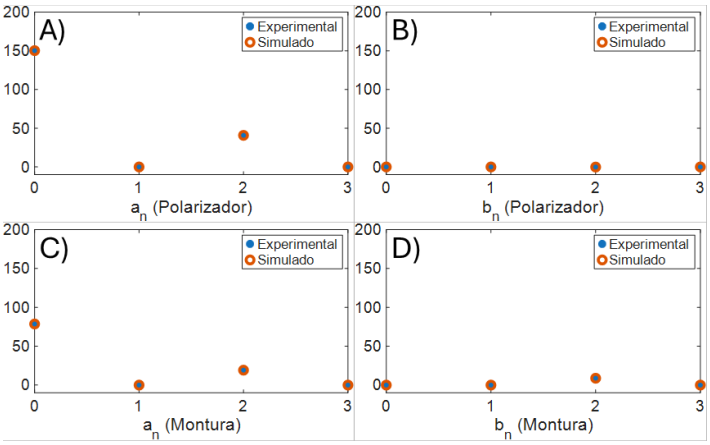


Figura 3. Comparación entre los coeficientes de Fourier experimentales y simulados obtenidos del análisis de la intensidad en función de la orientación del polarizador para las configuraciones de polarizador lineal (A–B) y montura óptica (C–D). Los coeficientes $\mathbf{a_n}$ y $\mathbf{b_n}$ permiten estimar los parámetros de Stokes $\mathbf{S_0}$, $\mathbf{S_1}$ y $\mathbf{S_2}$, a través de los términos $\mathbf{a_0}$, $\mathbf{a_2}$ y $\mathbf{b_2}$. La estrecha coincidencia entre ambos conjuntos de datos evidencia la precisión del método de reconstrucción polarimétrica implementado.

Una vez calculadas las componentes vectoriales $\mathbf{S_0}$, $\mathbf{S_1}$ y $\mathbf{S_2}$ para la totalidad de la matriz de píxeles, se procedió a realizar la descomposición para los tres canales fundamentales del sensor (Rojo, Verde y Azul). Este procedimiento permitió cartografiar bidimensionalmente el Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP) en toda la escena visible.

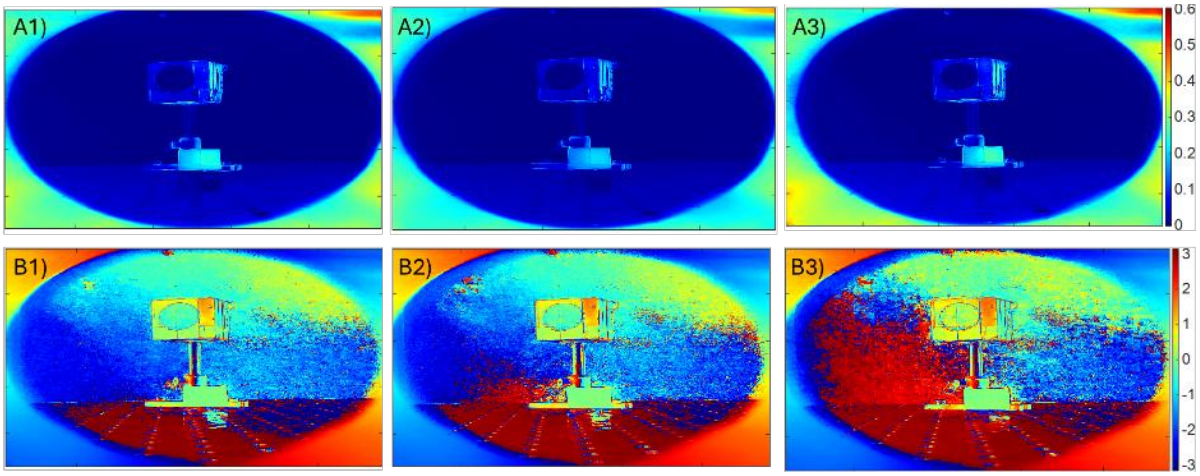


Figura 4. Mapas multiespectrales de parámetros ópticos lineales calculados a partir de las imágenes polarimétricas. La fila superior (A) corresponde al Grado de Polarización Lineal (DoLP) y la fila inferior (B) al Ángulo de Polarización Lineal (AoLP). Los mapas se presentan para los canales cromáticos: (1) Rojo, (2) Verde y (3) Azul.

La Figura 4 presenta los mapas espaciales calculados para cada canal cromático (RGB). La fila superior (Figura 4-A) muestra el Grado de Polarización Lineal, mientras que la fila inferior (Figura 4-B) detalla el Ángulo de Polarización Lineal.

El análisis del DoLP (Figuras 4-A1, A2 y A3) demuestra que los materiales dieléctricos lisos, como la montura óptica, inducen un DoLP significativamente mayor que las superficies rugosas del fondo. Físicamente, estas últimas provocan esparcimiento múltiple (multiple scattering), un fenómeno que despolariza la luz y reduce los valores del vector medido a niveles cercanos a cero.

Por otra parte, los mapas de AoLP (Figuras 4-B1, B2 y B3) revelan que la orientación del vector de polarización depende directamente de la geometría de los planos de incidencia y reflexión en el objeto. Las ligeras variaciones observadas entre los canales RGB se deben a la dispersión cromática de las lentes de la cámara y a la dependencia espectral del índice de refracción de los materiales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó, implementó y validó experimentalmente un dispositivo óptico pasivo de polarimetría de imágenes acoplado a un sistema de control optoelectrónico embebido. A través del formalismo de Stokes-Mueller y el análisis armónico mediante series de Fourier, el sistema demostró una alta precisión y robustez en la reconstrucción analítica del Grado de Polarización Lineal (DoLP) y el Ángulo de Polarización Lineal (AoLP) a través de los canales cromáticos RGB en el espectro visible.

Los resultados experimentales confirmaron que la polarimetría de imágenes proporciona una dimensión de contraste físico superior a la fotografía convencional basada únicamente en irradiancia escalar. El análisis espacial permitió discriminar con éxito firmas morfológicas y texturales intrínsecas de los objetos bajo estudio. Se demostró cuantitativamente que las superficies dieléctricas lisas conservan un alto grado de polarización lineal por reflexión, mientras que las texturas rugosas inducen procesos de esparcimiento múltiple (multiple scattering), provocando una despolarización medible del campo electromagnético. Asimismo, el mapeo del AoLP validó la dependencia directa de la orientación del vector de polarización con respecto a la geometría de los planos tangenciales de incidencia de la luz.

La correspondencia obtenida entre los datos experimentales y los modelos simulados fundamenta la viabilidad técnica de este dispositivo como un instrumento pasivo, de bajo costo y alta resolución espacial. El éxito en la calibración y extracción de los parámetros de Stokes $(\boldsymbol{S_0}, \boldsymbol{S_1}, \boldsymbol{S_2})$ en el espectro visible sienta las bases experimentales para la siguiente etapa de esta línea de investigación: la transición del sistema hacia entornos abiertos para la teledetección atmosférica.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. S. Tyo, D. L. Goldstein, D. B. Chenault et al., “Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications,” Applied Optics 45(22), 5453 (2006), https://doi.org/10.1364/AO.45.005453
2. K. Aydin, T. A. Seliga, and V. Balaji, “Remote Sensing of Hail with a Dual Linear Polarization Radar,” Journal of Applied Meteorology and Climatology 25(10), 1475–1484 (1986), https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<1475:RSOHWA>2.0.CO;2
3. A. R. Holt, “Some factors affecting the remote sensing of rain by polarization diversity radar in the 3 - to 35 - GHz frequency range,” Radio Science 19(5), 1399–1412 (1984), https://doi.org/10.1029/rs019i005p01399
4. A. R. Dahlberg, N. J. Pust, and J. A. Shaw, “Effects of surface reflectance on skylight polarization measurements at the Mauna Loa Observatory,” Optics Express 19(17), 16008, (2011), https://doi.org/10.1364/OE.19.016008
5. N. J. Pust and J. A. Shaw, “Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies,” Applied Optics 47(34), H190 (2008), https://doi.org/10.1364/AO.47.00H190
6. L. M. Dahl, M. J. Tauc and J. A. Shaw, “Cloud thermodynamic phase detection using an all-sky imaging polarimeter” Proceedings SPIE Optical Engineering + Applications (2017), https://doi.org/10.1117/12.2274354
7. T. Hashimoto, L. M. Dahl, S. A. Laurie, et al., “Camera characterization for all-sky polarization measurements during the 2017 solar eclipse,” Proceedings SPIE Optical Engineering + Applications, Polarization Science and Remote Sensing VIII 1040706 (2017), https://doi.org/10.1117/12.2274490
8. N. J. Pust and J. A. Shaw, “Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies,” Applied Optics 47(34), H190 (2008), https://doi.org/10.1364/AO.47.00H190

9. L. M. Eshelman, and J. A. Shaw, “Visualization of all-sky polarization images referenced in the instrument, scattering, and solar principal planes,” Optical Engineering 58(08), 082418 (2019), https://doi.org/10.1117/1.OE.58.8.082418
10. L. M. Eshelman, M. J. Tauc, and J. A. Shaw, “All-sky polarization imaging of cloud thermodynamic phase,” Optics Express 27(3), 3528-3541 (2019), https://doi.org/10.1364/OE.27.003528
11. L. M. Eshelman, M. J. Tauc, T. Hashimoto, et al., “All-sky polarization measurements of the total solar eclipse on 21 August 2017,” Proc. SPIE 10655 Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XIII, 106550L (2018); https://doi.org/10.1117/12.2305162
12. R. A. Chipman, W. S. T. Lam, and G. Young, Polarized Light and Optical. Systems, CRC press. (2018), https://doi.org/10.1201/9781351129121
13. D. Goldstein, Polarized Light, CRC press. (2011), https://doi.org/10.1201/b10436

PROCESAMIENTO AUTOMATIZADO DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS PARA LA DETECCIÓN DE SOBRECARGAS MUSCULARES EN CICLISTAS

Salvador Ortiz Santos[1], Georgina del Carmen Mota Valtierra[1], Blanca Cecilia López Ramírez[2*], Luis Ramón Sánchez Rico[2], Michael Mateo Melgarejo Uribe[3], Julián Esteban Sanabria Rojas[3] y Ma. Cristina Vázquez Hernández[2]

[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. [2] Instituto Tecnológico de Roque, Tecnológico Nacional de México, Celaya, Guanajuato, México. [3] Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca, Chía, Cundinamarca, Colombia.
blanca.lr@roque.tecnm.mx

RESUMEN

La termografía infrarroja permite analizar la respuesta térmica superficial asociada al esfuerzo físico; sin embargo, el procesamiento manual de termogramas puede introducir variabilidad en la delimitación de regiones anatómicas y zonas de interés. Este trabajo propone un flujo de trabajo computacional para el procesamiento automatizado de imágenes termográficas de las extremidades inferiores de ciclistas aficionados. La metodología integró cuatro fases: OCR y limpieza visual, aislamiento anatómico, segmentación térmica mediante agrupamiento y detección de focos térmicos para el análisis de simetría bilateral. Se analizaron 899 termogramas de 76 ciclistas, obtenidos antes y después de una prueba de ejercicio en bicicleta estacionaria. Los resultados permitieron transformar los termogramas originales en información estructurada, incluyendo focos térmicos, áreas críticas, zonas anatómicas e índice de Jaccard. La mayor frecuencia de focos térmicos se observó en el cuádriceps de ambas extremidades. Además, el índice de Jaccard mostró una elevada similitud bilateral, con un promedio de 0.7953 y 498 registros superiores a 0.8. El flujo propuesto facilita la cuantificación reproducible de patrones térmicos en ciclistas y puede servir de apoyo para estudios de respuesta térmica asociada al ejercicio.

Palabras clave: termografía infrarroja; ciclistas; procesamiento de imágenes; focos térmicos; simetría bilateral.

INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja se ha consolidado como una herramienta no invasiva para registrar la temperatura superficial de la piel y analizar las respuestas fisiológicas asociadas al ejercicio. En el ámbito deportivo, permite observar cambios térmicos relacionados con la actividad muscular, la termorregulación, la recuperación y posibles asimetrías entre regiones corporales homólogas [1,2]. En comparación con métodos que requieren sensores adheridos o contacto físico, la termografía infrarroja permite registrar cambios en la temperatura cutánea sin contacto directo, lo que facilita evaluaciones repetidas antes y después del ejercicio [1–3].

En el ciclismo, el análisis térmico de las extremidades inferiores resulta especialmente relevante, ya que el pedaleo implica una demanda mecánica repetitiva sobre grupos musculares como cuádriceps, gemelos y estructuras articulares de la rodilla. Estudios recientes han mostrado que la temperatura cutánea de los miembros inferiores puede variar durante pruebas de esfuerzo en bicicleta y que la termografía puede aportar información complementaria sobre la carga de ejercicio, el confort, la distribución térmica y posibles zonas de sobrecarga [4–6]. Sin embargo, la interpretación de estas imágenes requiere condiciones de adquisición controladas, ya que factores ambientales, postura, humedad, distancia de captura, emisividad y la preparación previa del sujeto pueden modificar los valores térmicos registrados [1,7].

Un antecedente directo de este trabajo es el protocolo estandarizado propuesto por Ortiz-Santos et al. (2026), orientado al monitoreo de la fatiga muscular y de la biomecánica en ciclistas aficionados

mediante termografía infrarroja. Dicho protocolo estableció criterios para la preparación del participante, el control ambiental, la configuración de la cámara y los momentos de captura, con el fin de reducir la variabilidad asociada a la adquisición de imágenes. No obstante, una vez obtenidos los termogramas, persiste el reto de procesar grandes volúmenes de imágenes de forma reproducible, especialmente cuando se requiere eliminar información superpuesta, aislar regiones anatómicas y comparar la distribución térmica entre ambas extremidades.

El análisis manual de termogramas depende del criterio del observador para delimitar regiones anatómicas y seleccionar zonas de interés, lo que puede introducir variabilidad en el procesamiento de múltiples imágenes [8,9]. Por ello, los métodos de visión por computadora y de aprendizaje automático constituyen una alternativa para estandarizar tareas como la limpieza visual, la segmentación anatómica, el agrupamiento térmico y la cuantificación de regiones de interés. En imágenes térmicas biomédicas, estas estrategias se han empleado para delimitar estructuras corporales y mejorar la reproducibilidad del análisis, tanto en estudios de cuerpo completo como en regiones anatómicas específicas [8–10].

En este trabajo, dichas estrategias se integraron mediante una red neuronal convolucional ligera para separar las extremidades inferiores del fondo y mediante K-Means para agrupar los píxeles anatómicos según su similitud cromática, sin requerir categorías previamente etiquetadas. Este enfoque resulta pertinente en termografía porque los cambios de color representan variaciones relativas de temperatura y pueden organizarse en niveles térmicos discretos para facilitar su interpretación. Además, la comparación bilateral de regiones térmicamente activas permite evaluar la simetría entre ambas extremidades, aspecto explorado en el análisis deportivo para estudiar la distribución térmica asociada al esfuerzo y posibles diferencias funcionales [11,12].

El presente trabajo propone un flujo computacional para el procesamiento automatizado de imágenes termográficas de las extremidades inferiores de ciclistas aficionados. La propuesta integra cuatro fases: OCR y limpieza visual, aislamiento anatómico, segmentación térmica mediante agrupamiento y detección de focos térmicos para el análisis de simetría bilateral. El objetivo es transformar termogramas originales en información estructurada y cuantificable, reduciendo la intervención manual y facilitando la obtención de métricas como áreas críticas, zonas anatómicas e índice de simetría bilateral. La validación se realizó con 899 termogramas de 76 ciclistas, adquiridos según un protocolo previamente estandarizado.

METODOLOGÍA

La metodología se estructuró en dos componentes: la adquisición termográfica estandarizada y el análisis automatizado en Python. El primero permitió controlar las condiciones del participante, el ambiente y la configuración de la cámara; el segundo integró la limpieza visual, el aislamiento anatómico, el agrupamiento térmico y el análisis bilateral a partir de los focos térmicos detectados. Para la validación experimental se emplearon 899 termogramas de 76 ciclistas, procesados desde la imagen original hasta la obtención de metadatos, regiones anatómicas aisladas, niveles térmicos agrupados, áreas críticas, zonas anatómicas e índice de simetría bilateral.

Protocolo de adquisición termográfica.

El protocolo de adquisición empleado en este estudio se obtuvo del trabajo metodológico previo de Ortiz-Santos et al. [3], en el cual se estableció un procedimiento estandarizado para el monitoreo de la fatiga muscular y la biomecánica en ciclistas aficionados mediante termografía infrarroja. Dicho protocolo definió las condiciones necesarias para reducir la variabilidad térmica asociada tanto a factores externos como al estado previo del participante.

Antes de la captura termográfica, se consideraron restricciones relacionadas con el consumo de alcohol, nicotina y cafeína, así como con la realización de ejercicio intenso y la aplicación de cremas u otros productos directamente sobre la piel de las extremidades inferiores. Asimismo, se incorporó

un periodo de aclimatación de 15 minutos, con el propósito de estabilizar la respuesta térmica superficial antes del registro de las imágenes.

Estas condiciones se complementaron con el registro de la temperatura ambiente y de la humedad relativa. Además, la cámara termográfica se configuró con una emisividad de 0.98, una resolución mínima de 320 × 240 píxeles, una distancia de captura de 100 cm y un ángulo de captura perpendicular cercano a 90° respecto a las extremidades inferiores. El ejercicio se realizó en bicicleta estática durante 20 minutos y se captaron imágenes al inicio y al final. En todos los casos, se conservaron la resolución original y los metadatos completos de las imágenes para su posterior procesamiento computacional. La secuencia general del protocolo de adquisición se muestra en la Figura 1. La figura resume las etapas consideradas para la adquisición de imágenes termográficas de extremidades inferiores, incluyendo las restricciones previas del participante, el periodo de aclimatación, la configuración de la cámara, el registro de condiciones ambientales, el ejercicio en bicicleta estacionaria y el momento de captura

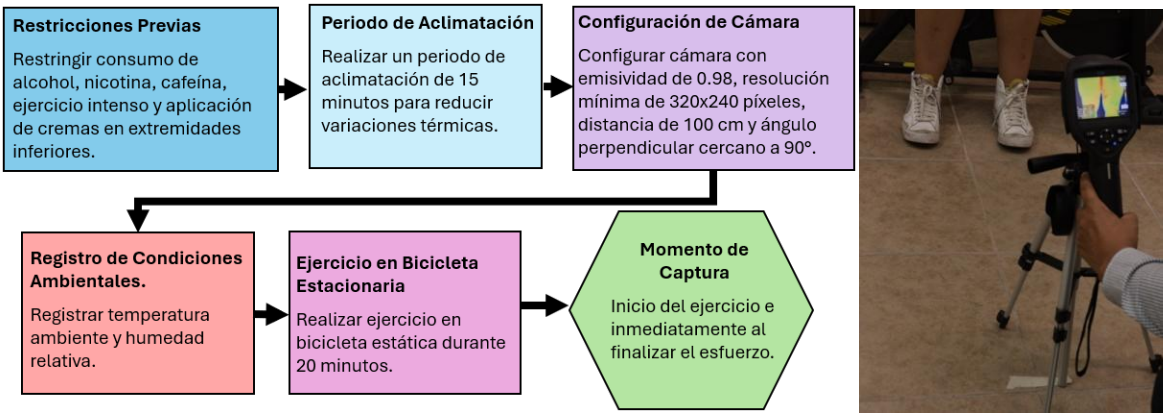


Figura 1. Protocolo estandarizado de adquisición termográfica en ciclistas aficionados.

Propuesta de procesamiento de imágenes termográficas.

La propuesta metodológica de esta investigación consiste en un flujo de trabajo computacional para el procesamiento automatizado de imágenes termográficas de las extremidades inferiores. Este flujo constituye el aporte principal del trabajo, ya que organiza secuencialmente las etapas de limpieza visual, aislamiento anatómico, agrupamiento térmico y análisis bilateral a partir de los focos térmicos detectados. Con ello, el termograma original se convierte en información estructurada y cuantificable, con menor intervención manual y mayor reproducibilidad. La Figura 2 muestra las fases que integran la propuesta desarrollada.

La figura 2 resume la propuesta metodológica implementada en Python para el análisis de imágenes termográficas de las extremidades inferiores. El flujo inicia con el termograma original como entrada del sistema y continúa con cuatro fases analíticas: (1) OCR y limpieza visual, orientada a la extracción de metadatos y eliminación de información superpuesta; (2) aislamiento anatómico, destinado a conservar únicamente las extremidades inferiores; (3) segmentación térmica por agrupamiento, mediante la organización de la distribución térmica en niveles discretos de temperatura; y (4) detección de focos térmicos y posterior análisis de simetría bilateral. A partir de estas fases se obtienen focos térmicos, áreas críticas, zonas anatómicas e índice de simetría bilateral.



Figura 2. Propuesta metodológica para el procesamiento de imágenes termográficas.

Para describir de manera específica el funcionamiento del flujo computacional propuesto, a continuación, se detallan la entrada del sistema y las cuatro fases analíticas que integran el procesamiento de las imágenes termográficas.

Entrada del sistema

Cada termograma original fue incorporado al sistema en formato .jpg, conservando la información visual generada durante la adquisición termográfica. Estas imágenes constituyeron el punto de partida del procesamiento computacional.

Fase 1. OCR y limpieza visual

En la primera fase se realizó la extracción automática de los metadatos técnicos visibles en el termograma y la eliminación de la información gráfica superpuesta por la cámara. Para mejorar la lectura del texto, la imagen se amplió tres veces antes de aplicar reconocimiento óptico de caracteres con Tesseract-OCR, configurado con la opción --psm 6. Posteriormente, se aplicó un barrido de umbrales para adaptar la lectura a las variaciones de brillo y contraste presentes en las imágenes.

Los metadatos recuperados incluyeron información técnica de la captura, como fecha, hora, emisividad, temperatura reflejada, distancia, humedad relativa, temperatura atmosférica, temperatura máxima y temperatura mínima. Después de esta extracción, los elementos visuales del HUD fueron eliminados mediante K-Means con $\boldsymbol{K = 20}$, lo que permitió identificar agrupamientos cromáticos asociados principalmente al texto en blanco y a las marcas visibles. Las regiones eliminadas fueron reconstruidas mediante el método TELEA, con un radio de 3 píxeles, para conservar la continuidad visual del termograma sin alterar la información térmica relevante. La salida de esta fase fue una imagen limpia y una base de metadatos asociada a cada archivo procesado.

Fase 2. Aislamiento anatómico

En la segunda fase se aisló la región anatómica de interés, correspondiente a las extremidades inferiores. Esta etapa tuvo como finalidad eliminar el fondo, los bordes, la vestimenta deportiva y otros elementos externos que pudieran interferir en el análisis térmico. Para ello, la imagen limpia fue procesada en el espacio de color HSV y, posteriormente, analizada mediante una red neuronal convolucional ligera implementada en TensorFlow/Keras.

La red se entrenó durante 5 épocas por imagen. Se empleó un umbral de fondo de 25 para separar el entorno no anatómico y un umbral de vestimenta de 65 para reducir la influencia de la ropa deportiva en la región superior de la imagen. Después de generar la máscara anatómica, se aplicaron operaciones morfológicas para mejorar la continuidad de la silueta y reducir las regiones pequeñas

o aisladas. Como salida, se obtuvo una imagen con las extremidades inferiores conservadas sobre un fondo negro, lo que facilitó el análisis térmico posterior únicamente en tejido anatómico.

Fase 3. Segmentación térmica por agrupamiento

En la tercera fase se agrupó la distribución térmica de las extremidades inferiores en cinco niveles discretos de temperatura. Para ello, se aplicó K-Means con $\boldsymbol{K = 5}$, configurado con $\boldsymbol{n_init = 10}$ y $\boldsymbol{random_state = 42}$. Debido a que K-Means es un método de agrupamiento no supervisado, en esta etapa no se realizó una clasificación supervisada, sino una organización de los píxeles anatómicos según su similitud cromática.

La salida fue una imagen agrupada por niveles de temperatura; las regiones frías, intermedias y cálidas quedaron representadas de manera discreta. Esta representación permitió simplificar la interpretación visual de la distribución térmica y preparar la imagen para la detección de focos térmicos en la siguiente fase.

De forma complementaria, se calculó un índice térmico relativo para sintetizar la intensidad térmica global de cada imagen. Este índice se obtuvo a partir de la proporción de píxeles rojos, amarillos y azules dentro de la región anatómica:

$$\boldsymbol{ITR} = (\%\boldsymbol{Rojo} \times \mathbf{3.0}) + (\%\boldsymbol{Amarillo} \times \mathbf{1.5}) - (\%\boldsymbol{Azul} \times \mathbf{1.5})$$

El índice asigna mayor peso a las zonas de mayor intensidad térmica, representadas por píxeles rojos, un peso intermedio a las zonas amarillas y una penalización a las zonas azules, asociadas a una menor intensidad térmica relativa.

Fase 4. Focos térmicos y simetría bilateral

En la cuarta fase se identificaron los focos térmicos de mayor intensidad y se comparó su distribución entre ambas extremidades inferiores. Primero, la imagen agrupada por niveles de temperatura se dividió en pierna derecha y pierna izquierda. Posteriormente, los focos térmicos fueron detectados mediante criterios de color asociados a las regiones de mayor temperatura relativa.

Para evitar que los focos térmicos quedaran fragmentados en regiones pequeñas, se aplicó una operación de cierre morfológico con una ventana de 7×7 píxeles. Esta operación permitió unir regiones térmicas cercanas, rellenar pequeñas discontinuidades y obtener áreas más continuas para el cálculo de contornos, de áreas críticas y de la localización anatómica. En cada extremidad se cuantificó el número de focos térmicos, su área en píxeles y su localización anatómica aproximada.

Finalmente, la comparación bilateral se realizó mediante el índice de Jaccard, definido como:

$$\boldsymbol{J} = \frac{|\boldsymbol{A} \cap \boldsymbol{B}|}{|\boldsymbol{A} \cup \boldsymbol{B}|}$$

donde A representa la región térmicamente activa detectada en la extremidad derecha y B representa la región térmicamente activa en la extremidad izquierda. El término $\boldsymbol{A} \cap \boldsymbol{B}$ corresponde al área de coincidencia entre ambas regiones, mientras que $\boldsymbol{A} \cup \boldsymbol{B}$ corresponde al área total ocupada por los focos térmicos de ambas piernas. La salida final de esta fase incluyó los focos térmicos detectados, el área crítica de cada extremidad, la zona anatómica donde se localizaron los focos y el índice de simetría bilateral calculado a partir del índice de Jaccard.

Configuración de las etapas metodológicas del procesamiento de imágenes termográficas

La Tabla 1 resume las etapas metodológicas empleadas en el procesamiento de las imágenes termográficas. En ella se especifican el propósito de cada fase, las herramientas utilizadas, la configuración principal del procedimiento y la salida generada. Esta organización permite identificar

la función de cada etapa del análisis, desde la incorporación del termograma original hasta la obtención de focos térmicos, áreas críticas, zonas anatómicas e índice de simetría bilateral.

Tabla 1. Configuración de las etapas metodológicas del análisis de las imágenes

Fase	Propósito	Herramientas	Configuración	Salida
Entrada	Incorporar imagen termográfica	Imagen digital	Imagen original en formato (jpg)	Termograma original
Fase 1. OCR y limpieza visual	Extraer metadatos técnicos y eliminar el HUD visible	Tesseract-OCR, OpenCV, K-Means, inpainting	Ampliación $\mathbf{3}\times$; OCR con --psm 6; barrido de umbrales; K-Means con $\boldsymbol{K = 20}$; inpainting TELEA con $\boldsymbol{radio = 3\,px}$	Metadatos extraídos e imagen limpia
Fase 2. Aislamiento anatómico	Conservar únicamente las extremidades inferiores	OpenCV, TensorFlow/Keras, CNN ligera, operaciones morfológicas	Segmentación en HSV; red convolucional ligera; 5 épocas; $\boldsymbol{umbral\ de\ fondo = 25}$; $\boldsymbol{umbral\ de\ vestimenta = 65}$.	Imagen anatómica aislada
Fase 3. Segmentación térmica	Agrupar la distribución térmica en niveles discretos	OpenCV, Scikit-learn, K-Means	K-Means con $\boldsymbol{K = 5}$; $\boldsymbol{n_init = 10}$; $\boldsymbol{random_state = 42}$; agrupación en cinco niveles térmicos	Imagen segmentada por niveles de temperatura
Fase 4. Focos térmicos y análisis simetría de bilateral	Detectar focos térmicos y comparar ambas piernas	OpenCV, NumPy, SciPy	Separación bilateral; detección de focos térmicos por color; cierre morfológico $\mathbf{7}\times\mathbf{7}$; cálculo de índice de Jaccard	Focos térmicos, áreas críticas, zonas anatómicas e índice de simetría

Finalmente, la metodología propuesta permitió integrar en un mismo flujo la adquisición controlada de termogramas y su análisis automatizado mediante herramientas computacionales. La secuencia de procesamiento facilitó la extracción de metadatos, la limpieza visual, el aislamiento anatómico de las extremidades inferiores, el agrupamiento térmico y la cuantificación bilateral de los focos térmicos. Con ello, se obtuvo una base estructurada de imágenes y métricas que reduce la intervención manual, mejora la trazabilidad del análisis y proporciona información objetiva para estudiar la distribución térmica asociada al esfuerzo físico en ciclistas.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar el flujo computacional propuesto a los termogramas analizados. Se incluyen tres aspectos principales: la secuencia visual del procesamiento, la distribución térmica y anatómica de los focos térmicos, y la evaluación de la simetría bilateral mediante el índice de Jaccard.

Evaluación visual del flujo computacional antes y después del ejercicio

La Figura 3 presenta un ejemplo representativo de la aplicación del flujo computacional propuesto en dos momentos de evaluación: antes y después del ejercicio. La fila superior corresponde al termograma previo al esfuerzo, mientras que la inferior muestra el procesamiento del termograma posterior al ejercicio. En ambos casos se observa la secuencia completa del método, desde la

imagen original hasta la obtención de la imagen final con focos térmicos y el análisis de simetría bilateral.

El resultado permite visualizar cómo cada fase contribuye al procesamiento de la imagen: primero se eliminan los elementos gráficos superpuestos, posteriormente se conserva la región anatómica de interés, después se agrupa la distribución térmica por niveles de temperatura y, finalmente, se identifican las regiones de mayor intensidad térmica. Al comparar ambas condiciones, se observa que, después del ejercicio, aumenta el área ocupada por regiones de mayor temperatura, principalmente en zonas representadas con colores cálidos. Esto sugiere que el flujo propuesto permite resaltar los cambios térmicos asociados al esfuerzo físico y facilita la comparación visual y cuantitativa entre ambas extremidades inferiores.

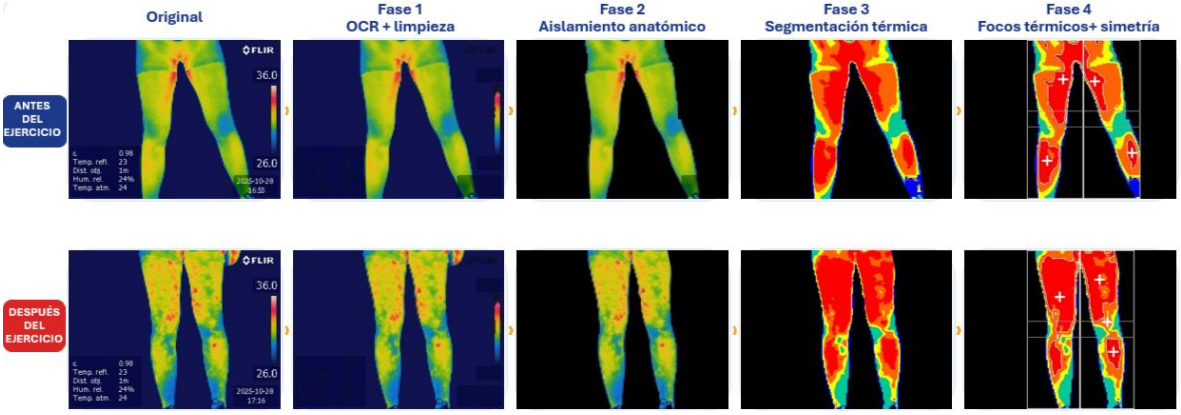


Figura 3. Secuencia de procesamiento de termogramas antes y después del ejercicio.

Distribución y frecuencia de focos térmicos anatómicos

La Figura 4 resume dos resultados del análisis térmico. En primer lugar, se presenta la distribución de las imágenes según el nivel térmico dominante. El nivel muy bajo/basal fue el más frecuente, con 391 imágenes equivalentes al 43.6 % del total analizado. Sin embargo, también se observó una proporción relevante de imágenes en niveles de mayor intensidad térmica: 176 imágenes correspondieron al nivel alto y 167 imágenes al nivel máximo/foco térmico; en conjunto, representan una fracción importante de los registros con mayor actividad térmica superficial. Esto indica que, aunque predominó una condición basal, el conjunto de datos también incluyó termogramas con regiones térmicamente activas suficientes para realizar un análisis anatómico.

En segundo lugar, la Figura 4 muestra la frecuencia de focos térmicos por región anatómica y por extremidad. La mayor concentración se observó en el cuádriceps, tanto en la pierna derecha como en la izquierda, con 616 y 587 detecciones, respectivamente. Esta distribución es consistente con la participación del muslo durante la fase de empuje del pedaleo. La zona de rodilla presentó una frecuencia intermedia, con 161 focos en la pierna derecha y 185 en la izquierda, mientras que la región de gemelos mostró la menor frecuencia, con 115 y 123 focos, respectivamente. En general, el patrón anatómico fue similar en ambas extremidades, con predominio de focos térmicos en el cuádriceps, seguido de la rodilla y de los gemelos.

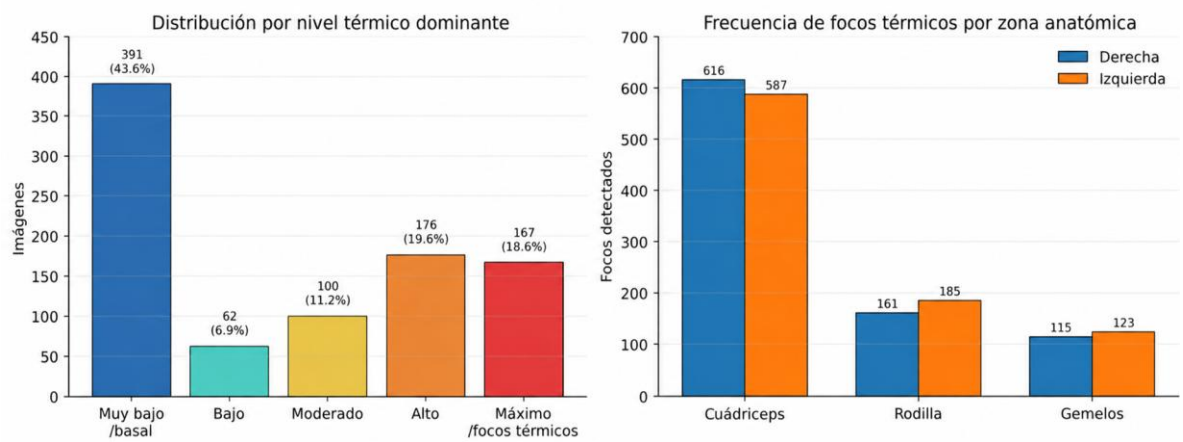


Figura 4. Distribución térmica dominante y frecuencia de focos térmicos por región anatómica

Análisis descriptivo del índice de Jaccard en la simetría bilateral

La Figura 5 muestra la distribución de los registros según el intervalo del índice de Jaccard. Se observa una concentración predominante en los valores altos de similitud bilateral, particularmente en el intervalo 0.8–1.0, con 321 registros, seguida del intervalo 0.6–0.8, con 256 registros. Además, se identificaron 177 registros con un Jaccard de 1.0, lo que indica una coincidencia completa entre las regiones térmicamente activas de ambas extremidades en dichos casos. En conjunto, estos resultados sugieren que una proporción importante de los termogramas presentó una distribución térmica bilateral con alta correspondencia espacial.

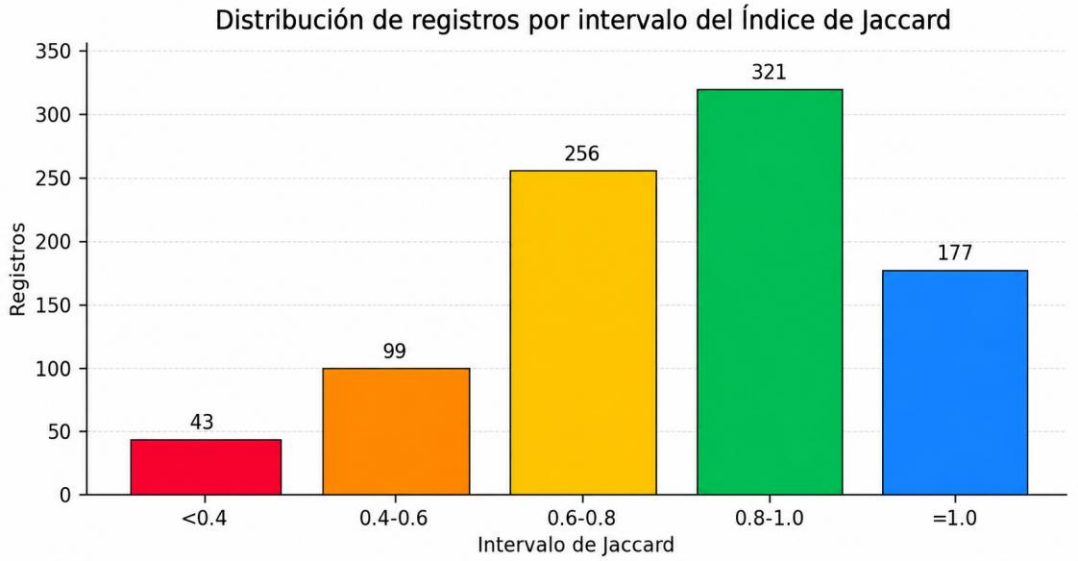


Figura 5. Distribución de registros según el intervalo del índice de Jaccard.

Los estadísticos descriptivos de la Tabla 2 refuerzan esta tendencia. El índice de Jaccard presentó un promedio de 0.7953 y una mediana de 0.8306, lo que indica que la mayoría de los registros se ubicó en niveles de similitud bilateral moderados a altos. La desviación estándar de 0.1918 evidencia variabilidad entre los registros, lo que puede asociarse con diferencias individuales, variaciones en la respuesta térmica posterior al ejercicio o posibles asimetrías anatómicas y funcionales. El rango observado fue amplio, con un valor mínimo de 0.0201 y un máximo de 1.0. Asimismo, se reportaron 498 registros con un Jaccard superior a 0.8, lo que confirma que la mayoría de las imágenes procesadas presentaron una elevada similitud bilateral en la distribución de los focos térmicos.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos del Índice de Jaccard.

Métrica	Valor
Promedio	0.7953
Mediana	0.8306
Desviación estándar	0.1918
Valor mínimo	0.0201
Valor máximo	1.0000
Registros con Jaccard = 1.0	177
Registros con Jaccard > 0.8	498

En conjunto, los resultados muestran que el flujo computacional propuesto permite transformar los termogramas originales en información térmica estructurada, visualizable y cuantificable. Además, la distribución de los focos térmicos y los valores del índice de Jaccard evidencian la utilidad del método para analizar cambios térmicos y simetría bilateral en extremidades inferiores de ciclistas.

CONCLUSIONES

El presente trabajo propuso un flujo de trabajo computacional para el procesamiento automatizado de imágenes termográficas de las extremidades inferiores de ciclistas aficionados. La metodología permitió transformar termogramas originales en información estructurada mediante cuatro fases principales: OCR y limpieza visual, aislamiento anatómico, segmentación térmica mediante agrupamiento y detección de focos térmicos para el análisis de simetría bilateral. Este procedimiento redujo la intervención manual en el tratamiento de las imágenes y permitió conservar la trazabilidad de los registros desde la imagen original hasta la obtención de métricas cuantitativas.

La aplicación del método a 899 termogramas de 76 ciclistas permitió identificar regiones de mayor temperatura, áreas críticas y zonas anatómicas asociadas con la respuesta térmica posterior al ejercicio. Los resultados mostraron que el cuádriceps fue la región con mayor frecuencia de focos térmicos en ambas extremidades. Asimismo, la comparación entre imágenes previas y posteriores al ejercicio permitió observar un incremento del área ocupada por regiones de mayor temperatura tras el esfuerzo físico.

El análisis de simetría bilateral mediante el índice de Jaccard mostró una tendencia general a valores altos de correspondencia espacial entre ambas extremidades. El promedio de 0.7953, la mediana de 0.8306 y los 498 registros con valores superiores a 0.8 indican que, en una proporción importante de los termogramas, la distribución de los focos térmicos presentó una similitud bilateral considerable. Estos resultados sugieren que el flujo propuesto resulta útil para organizar, visualizar y cuantificar los patrones térmicos en las extremidades inferiores de ciclistas.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra que el análisis se basó en criterios computacionales de color, forma y distribución espacial; por lo tanto, los resultados no deben interpretarse como diagnóstico clínico. Además, aunque el sistema permitió automatizar etapas relevantes del procesamiento, la calidad de los resultados puede verse afectada por variaciones en la postura del participante, la presencia de vestimenta, capturas con bajo contraste, regiones anatómicas parcialmente visibles o diferencias en la iluminación térmica del termograma. Otra limitación es que el índice de Jaccard cuantifica la similitud espacial entre regiones térmicamente activas, pero no explica por sí solo la causa fisiológica de una posible asimetría.

Como trabajos futuros, se propone validar los focos térmicos y las áreas críticas mediante la revisión por parte de especialistas en medicina deportiva, fisioterapia o biomecánica. Además, se plantea ampliar la base de datos con mayor variabilidad postural, térmica y morfológica, así como incorporar variables complementarias, como cadencia, potencia, percepción subjetiva del esfuerzo, frecuencia cardíaca o electromiografía, para enriquecer la interpretación de los patrones térmicos observados.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Rojas-Valverde, P. Tomás-Carús, R. Timón, N. Batalha, B. Sánchez-Ureña, R. Gutiérrez-Vargas, and G. Olcina, “Short-term skin temperature responses to endurance exercise: a systematic review of methods and future challenges in the use of infrared thermography,” Life, Vol. 11, 12, 2021, pp. 1286.
2. L. Masur, F. Brand, and P. Düking, “Response of infrared thermography related parameters to (non-)sport specific exercise and relationship with internal load parameters in individual and team sport athletes—a systematic review,” Front. Sports Act. Living, Vol. 6, 2024, pp. 1479608.
3. S. Ortiz-Santos, G. del C. M. Valtierra, Ma. C. Vazquez Hernández, J. N. G. Tavares, B. C. López Ramírez, and G. M. Bobadilla, “Standardized protocol for monitoring muscle fatigue and biomechanics in amateur cyclists using infrared thermography,” JoVE, 229, 2026, pp. e69926.
4. M. Kapoor, V. Vasdev, R. K. Singh, R. Jaipurkar, and G. Sikri, “Relationship between aerobic fitness and lower limb skin temperature during cycling exercise testing among well-trained athletes and nonathletes: a cross-sectional study,” Medical Journal Armed Forces India, Vol. 79, 2023, pp. S165–S174.
5. C. Hu, N. Du, Z. Liu, and Y. Song, “Can infrared thermal imaging reflect exercise load? an incremental cycling exercise study,” Bioengineering, Vol. 12, 3, 2025, pp. 280.
6. W. Clarys, O. Vallet, J. Verstockt, H. Zhang, S. Verspeek, and G. Steenackers, “Thermography in bike fitting: a literature review,” Sensors, Vol. 25, 8, 2025, pp. 2356.
7. H. Y. Zhang, S. Son, B. R. Yoo, and T.-M. Youk, “Reference standard for digital infrared thermography of the surface temperature of the lower limbs,” Bioengineering, Vol. 10, 3, 2023, pp. 283.
8. H. Asano, E. Hirakawa, H. Hayashi, K. Hamada, Y. Asayama, M. Oohashi, A. Uchiyama, and T. Higashino, “A method for improving semantic segmentation using thermographic images in infants,” BMC Med Imaging, Vol. 22, 1, 2022, pp. 1.
9. M. Arnal, C. Bourrilhon, V. Beauchamps, F. Sauvet, H. Zahouani, and C. Thieulin, “An automated semantic segmentation methodology for infrared thermography analysis of the human hand,” JSAN, Vol. 13, 6, 2024, pp. 86.
10. A. Bougrine, R. Harba, R. Canals, R. Ledee, M. Jabloun, and A. Villeneuve, “Segmentation of plantar foot thermal images using prior information,” Sensors, Vol. 22, 10, 2022, pp. 3835.
11. A. Szurko, T. Kasprzyk-Kucewicz, A. Cholewka, M. Kazior, K. Sieroń, A. Stanek, and T. Morawiec, “Thermovision as a tool for athletes to verify the symmetry of work of individual muscle segments,” IJERPH, Vol. 19, 14, 2022, pp. 8490.
12. A. De León-Muñoz, J. I. Priego-Quesada, J. M. Marzano-Felisatti, J. L. Sanchez-Jimenez, C. Sendra-Pérez, and I. Aparicio-Aparicio, “Preliminary application of infrared thermography to monitoring of skin temperature asymmetries in professional padel players,” Sensors, Vol. 24, 14, 2024, pp. 4534.

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES Y VIDEO CIENTÍFICO EN UNA COMPUTADORA DE UNA SOLA PLACA

Armando Gómez Vieyra, Mario Atilano Balvis, Hugo Enrique Ibarra Villalon, José Raúl Miranda Tello

División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

agvte@azc.uam.mx

RESUMEN

La obsolescencia tecnológica prematura en los laboratorios de investigación suele derivarse de la incompatibilidad o falta de actualización del software, incluso cuando el hardware conserva su vigencia y capacidad operativa. Este fenómeno se ha identificado en el Laboratorio de Sistemas Complejos de la UAM-Azcapotzalco, particularmente en cámaras científicas de alto desempeño de la serie FLIR Flea®3, cuyo desuso implica una pérdida significativa de capacidad experimental y analítica. Ante esta problemática, una alternativa viable consiste en la implementación de arquitecturas de control abiertas que permitan la reutilización e integración de estos dispositivos en nuevos entornos de adquisición de datos. Por consiguiente, con el objetivo de optimizar los recursos institucionales, este trabajo describe el desarrollo de un sistema embebido para adquisición de imágenes que integra la cámara mencionada con una plataforma Raspberry Pi. El sistema se implementó bajo la compilación de controladores ROS–FLIR, lo que permitió la comunicación eficiente entre el hardware y el entorno de adquisición. Adicionalmente, dicho sistema fue configurado con un software de captura desarrollado específicamente para esta aplicación, el cual integra una interfaz en Python y rutinas de control de bajo nivel programadas en C. Esta arquitectura permite la manipulación en tiempo real de parámetros críticos como la velocidad de obturación y la sensibilidad. Adicionalmente, la implementación del sistema con el software desarrollado estableció una comunicación directa con la cámara mediante los controladores ROS–FLIR o, alternativamente, a través de V4L2; además, permitió el control de parámetros críticos como el tiempo de exposición, la ganancia, el *shutter*, el formato de salida, la profundidad de bits y la tasa efectiva de cuadros. Por otro lado, para la validación experimental de adquisición de imágenes, se estableció una configuración operativa en modo mono8, con una resolución de 1296 x 1004 px, tiempo de exposición de 1423 µs, ganancia de 0 dB y nivel de negro de 1.46, garantizando así la estabilidad radiométrica y la reproducibilidad de los flujos de datos. La evaluación del desempeño del sistema se llevó a cabo mediante un arreglo de Shadowgraph en configuración aplanática de Abbe, lo que permitió analizar la capacidad del sistema para registrar fenómenos de bajo contraste, específicamente aquellos originados por variaciones locales en el índice de refracción. Como resultado, se verificó que el sistema permite la adquisición estable de imágenes y video bajo distintos regímenes de captura, así como el control preciso de parámetros experimentales y el registro de datos con integridad temporal mediante el almacenamiento de metadatos asociados. En conclusión, el sistema embebido constituye una solución de bajo costo y alta configurabilidad para la adquisición de imágenes, con potencial para su implementación en aplicaciones de procesamiento en tiempo real y automatización de diversos arreglos experimentales.

INTRODUCCIÓN

En la era digital, la adquisición y procesamiento de imágenes son pilares fundamentales de la ciencia y la tecnología. Durante décadas, el sector ha debatido entre dos tecnologías dominantes: los dispositivos de carga acoplada (CCD, por sus siglas en inglés *charge-coupled device*) y los sensores CMOS (por sus siglas en inglés *complementary metal-oxide seminconductor*). Mientras que los CCD destacaron históricamente por su fidelidad, los avances en CMOS han facilitado una integración más eficiente en sistemas embebidos, ofreciendo mayor velocidad y menor consumo energético. Para aprovechar estas ventajas en plataformas de bajo costo, este proyecto presenta el desarrollo de

librerías de código abierto que integran una cámara Flea3 con una Raspberry Pi bajo entornos Linux. Como resultado, este sistema permite una adquisición modular de imagen y video, siendo de utilidad para sistemas ópticos especializados. Particularmente, esta configuración no solo aprovecha la versatilidad de Raspberry Pi, sino que permite el acceso a herramientas de alta precisión, facilitando la innovación científica reproducible y escalable en laboratorios con recursos limitados.

TEORÍA

La cámara Flea3 FL3-U3-32S2M-CS integra un sensor CMOS de alto rendimiento, diseñado para entornos científicos que exigen velocidad, bajo ruido y un control riguroso de la captura de la imagen o de la adquisición del video. A diferencia de la tecnología CCD, este sensor CMOS integra los procesos de lectura, amplificación y conversión directamente en el chip, lo que optimiza el consumo energético y eleva las tasas de adquisición.

Este modelo emplea una arquitectura de obturador global (global shutter) de Point Grey (ahora FLIR), que garantiza la exposición simultánea de todos los píxeles. En particular, esta configuración es crítica para evitar distorsiones geométricas (típicas del rolling shutter) y resulta indispensable en el estudio de fenómenos dinámicos, vibraciones o patrones de cambio rápido.

Entre las especificaciones del sensor CMOS de la Flea3 destacan:

- Resolución: 3.2 MP (2080 × 1552 px), óptima para aplicaciones de análisis de estructuras finas y sistemas ópticos de laboratorio.
- Tamaño de pixel: 3.45 µm, logrando un equilibrio entre resolución espacial y capacidad de pozo (*well capacity*).
- Velocidad de adquisición: hasta 60 fps en resolución completa mediante USB 3.0, permitiendo el procesamiento en tiempo real.
- Profundidad de bits: modos de 8 o 12 bits seleccionables según la sensibilidad requerida.
- Sensibilidad espectral: alta eficiencia en el espectro visible e infrarrojo cercano (NIR), ideal para iluminación LED o láser.
- Conversión analógica–digital en chip: minimiza el ruido de lectura y asegura la uniformidad de la imagen.

En conjunto, estas prestaciones posicionan a la Flea3 como una solución robusta para instrumentación óptica, con un rendimiento equiparable al de cámaras científicas de gama alta.

La cámara Flea3, con comunicación USB 3.0 y el estándar IIDC/DCAM, puede ser controlada en el lenguaje C++ mediante *libusb*, *libuvc* o el *SDK* (*software development kit*) propietario *FlyCapture2*® de FLIR Systems. Este trabajo tiene como objetivo replicar las funciones esenciales de dicho *SDK* en una implementación de código abierto, optimizada para la arquitectura *ARM64* de la Raspberry Pi 5.

Si bien la potencia de la Raspberry Pi 5 permite la compilación nativa, se optó por un flujo de compilación cruzada (*cross-compilation*) desde sistemas x86 empleando *CMake* y el *toolchain* oficial de Raspberry Pi OS. Este enfoque garantiza la portabilidad de las librerías en entornos Linux bajo estándares POSIX, mientras que el uso de Git asegura la trazabilidad y documentación de cada versión del código.

El software emplea un diseño modular que gestiona la adquisición continua o sincronizada mediante hilos de ejecución (*multithreading*) y temporizadores de alta precisión. La integración con Python se resuelve mediante *callbacks* asincrónicos o colas de mensajes, permitiendo que la interfaz gráfica se actualice sin comprometer el flujo de captura. Esta arquitectura garantiza una adquisición estable y sin pérdida de cuadros (*dropped frames*), incluso durante procesos simultáneos de análisis o visualización.

PARTE EXPERIMENTAL

La metodología propuesta integra el hardware, conformado por la cámara FLIR Flea3, la Raspberry Pi 5 y el bus USB 3.0, con el software científico desarrollado específicamente para este sistema. En particular, el sistema se organiza como una arquitectura secuencial en la que cada módulo garantiza la comunicación efectiva entre la cámara, el dispositivo embebido y la interfaz final de captura. Este flujo de trabajo se divide en cinco etapas principales, ilustradas en la Figura 1, las cuales se describen a continuación:

- Preparación del entorno: esta incluye
  - Instalación y configuración de Raspberry Pi OS.
  - Habilitación del soporte para USB 3.0 y V4L2.
  - Instalación de dependencias necesarias para la cámara y los controladores ROS.
  - Configuración del entorno virtual de Python para ejecutar la interfaz gráfica y rutinas auxiliares.

- Inicialización y comunicación con cámara Flea3: en esta etapa se procede a:
  - Conectar y verificar la detección de la cámara mediante herramientas del sistema como *lsusb*, *dmesg* y *v4l2-ctl*.
  - Identificar posibles errores en el enlace USB 3.0 y cargar los módulos necesarios del kernel.
  - Realizar pruebas preliminares de transmisión de frames para verificar integridad y estabilidad del enlace

- Compilación e instalación de los drivers ROS FLIR: Los controladores oficiales de FLIR para ROS se compilaron directamente en la Raspberry Pi con el fin de garantizar un control integral del sensor. Estos drivers constituyen una capa de comunicación robusta entre el hardware y el software de captura, y permiten ajustar variables de operación como exposición, ganancia, tiempos de obturación, modos de captura y tasa de cuadros.

- Programa científico de captura desarrollado: este es diseñado para funcionar como una herramienta de captura científica de propósito general, inspirada en aplicaciones como *GUVCview*, pero programada completamente desde cero y con funcionalidades especializadas para cámaras de alta velocidad empleadas en instrumentación. La aplicación opera específicamente con la cámara FLIR Flea3 y ejecutarse de manera optimizada en plataformas Raspberry Pi. El software desarrollado cumple:
  - Establecer comunicación directa con la cámara utilizando los controladores ROS FLIR o, alternativamente, mediante V4L2.
  - Controlar parámetros críticos como exposición, ganancia, *shutter*, formato de salida, profundidad de bits y tasa efectiva de cuadros.
  - Proveer una interfaz visual intuitiva para supervisión del video capturado.
  - Registrar imágenes individuales o secuencias completas junto con metadatos asociados, garantizando integridad temporal y consistencia de datos.

- Registro, almacenamiento y validación de datos: Cada secuencia o imagen adquirida se almacena junto con sus metadatos asociados (tiempo, parámetros de captura, ganancia, exposición), y posteriormente se ejecutan validaciones para verificar integridad del archivo generado, ausencia de *dropped frames*, consistencia del *timestamp* con la tasa de captura esperada y correspondencia entre los parámetros establecidos y los valores realmente aplicados por el sensor.

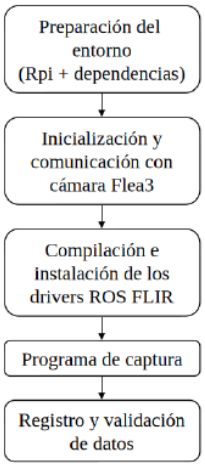


Figura 1, Diagrama de proceso para la adquisición de imágenes y video científico mediante la cámara Flea3 FL3-U3-32S2M-CS

Específicamente, la cámara Flea3 permite el control detallado de múltiples parámetros de captura. Los ajustes configurados durante la integración incluyen:

- **Tiempo de exposición**: ajustado para evitar saturación o subexposición según condiciones
- de iluminación.
- **Ganancia**: calibrada para asegurar una señal adecuada sin incrementar el ruido electrónico.
- **Shutter global/rolling**: configurado según las necesidades experimentales.
- **Profundidad de bits**: seleccionada para equilibrar rango dinámico y carga de datos.
- **Resolución y región de interés (ROI)**: ajustadas para optimizar ancho de banda y velocidad.
- **Tasa de cuadros (FPS)**: establecida para maximizar rendimiento sin pérdida de frames.

Estos parámetros se configuraron tanto desde el driver ROS como desde el programa de captura, lo que permitió una interacción flexible entre ambos sistemas.

Arquitectura general del software desarrollado

El sistema se encuentra compuesto por dos módulos principales:

- Módulo de captura (backend) en C++: dedicado a la comunicación con la cámara, la gestión eficiente de memoria y el procesamiento inicial de los datos.
- Interfaz de control en Python: encargada de la interacción con el usuario, el monitoreo visual, el ajuste de parámetros y el almacenamiento final de las imágenes capturadas.

El programa se estructura de acuerdo con las subrutinas presentadas en la Figura 2, las cuales se discuten a continuación.

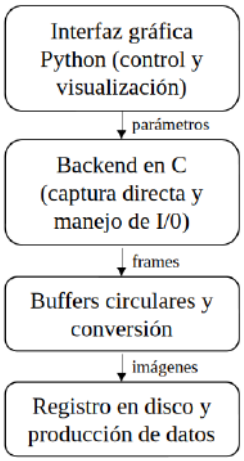


Figura 2. Diagrama de procesos de la subrutina obtención de imágenes

- Interfaz gráfica en Python: en esta interfaz se emplean librerías de alto nivel para asegurar facilidad de desarrollo y flexibilidad, proporcionando las siguientes funcionalidades:
  - Control directo del tiempo de exposición, ganancia, shutter y región de interés.
  - Visualización en tiempo real del flujo de video.
  - Indicadores de estado del sistema (FPS, uso de CPU, estado del enlace).
  - Botones y menús configurables para controlar la adquisición.
  - Registro manual o automático de secuencias de video e imágenes individuales.

  La interfaz se comunica con el backend en C++ mediante llamados directos a funciones compiladas, permitiendo una interacción fluida sin bloqueos.
- Módulo de Backend en lenguaje C++: este módulo permite manejar grandes cantidades de datos a alta velocidad, realizando las siguientes tareas:
  - Inicialización del dispositivo y apertura del canal de comunicación.
  - Configuración de parámetros de adquisición definidos por el usuario.
  - Gestión de buffers circulares para el almacenamiento temporal de los frames.
  - Conversión preliminar de formatos cuando es necesario.
  - Manejo de errores, reconexión automática y supervisión de la estabilidad del enlace USB 3.0.

  Para garantizar un rendimiento adecuado, se emplearon mecanismos de concurrencia mediante *threads*, permitiendo la captura simultanea de imágenes, su procesamiento y su transferencia al módulo en Python.
- Estructura de comunicación C–Python: %Esta no aparece en la Fig. 2% esta arquitectura permite la interacción entre la interfaz gráfica y el módulo de backend a partir del diseñó de un puente de comunicación, el cual está basado en:
  - *ctypes* para exponer funciones del backend al entorno Python.
  - Estructuras de datos compartidas para transportar parámetros de configuración.
  - Buffers de memoria accesibles desde ambos entornos.
  - Mecanismos de sincronización para garantizar consistencia temporal.

  Esta arquitectura asegura que la interfaz gráfica pueda solicitar frames bajo demanda sin afectar la velocidad de captura.
- Gestión de buffers y flujo de datos: este proceso es de suma importancia para el control de los grandes volúmenes de datos generados por segundo generados por la cámara Flea3. La subrutina implementa un sistema basado en:
  - Buffers circulares: permiten almacenar secuencias temporalmente durante la reproducción o visualización.
  - Bloques de transferencia: optimizados para operaciones de lectura/escritura en la Raspberry Pi.

    - Control dinámico de memoria: ajustado según resolución, profundidad de bits y FPS seleccionados.
- Control de parámetros de captura %no está en la Fig. 2% en este bloque se permite modificar parámetros esenciales de la cámara en tiempo real: exposición, ganancia, velocidad de obturación, resolución seleccionada, profundidad de bits y velocidad deseada de cuadros por segundo. Esta subrutina toma los cambios aplicados por la interfaz gráfica se transmiten de inmediato al módulo de captura en C++, lo que permite adaptar las condiciones experimentales sin necesidad de reiniciar el sistema.
- Registro y almacenamiento de datos: esta subrutina admite múltiples modos de almacenamiento:
    - Captura de imágenes individuales: permite guardar un frame exacto desde la interfaz
    - Registro continuo: guarda secuencias de video en formatos RAW o comprimidos

  A cada archivo generado se le agregan metadatos tales como: marca de tiempo, configuración activa del sensor, FPS medido y temperatura del sensor (si ROS proporciona el dato).

RESULTADOS

Los resultados experimentales se obtuvieron utilizando un arreglo Shadowgraph en una configuración de Abbe (sistema sin coma ni esférica), el cual se muestra en la Fig. 3. Los videos se capturaron con la cámara monocromática Flea3 configurada con los siguientes parámetros:

- Tiempo de exposición: 1423μs
- Ganancia: 0dB
- Black level: 1.46
- Resolución: 1296×1004 px
- Formato: Mono 8
- Extracción de fotogramas: ffmpeg

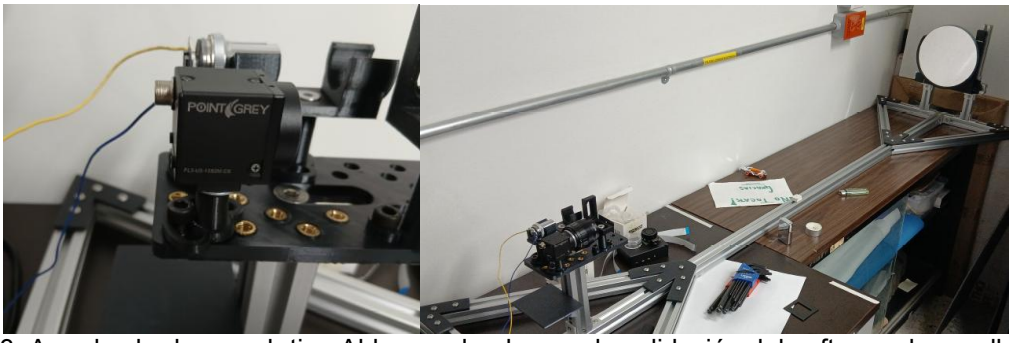


Figura 3. Arreglo shadowgraph tipo Abbe empleado para la validación del software desarrollado.

Principalmente, se realizaron diferentes experimentos para validar la implementación del sistema. Uno de los casos más ilustrativos de la dinámica de un fluido transparente es la salida de aire comprimido, el cual se capturo bajo el arreglo shadowgraph con el sistema de adquisición propuesto. De las imágenes adquiridas, a continuación, se muestran las secuencias de 12 fotogramas a 60 FPS y a 120 FPS en las Figs. 4 y 5, respectivamente.

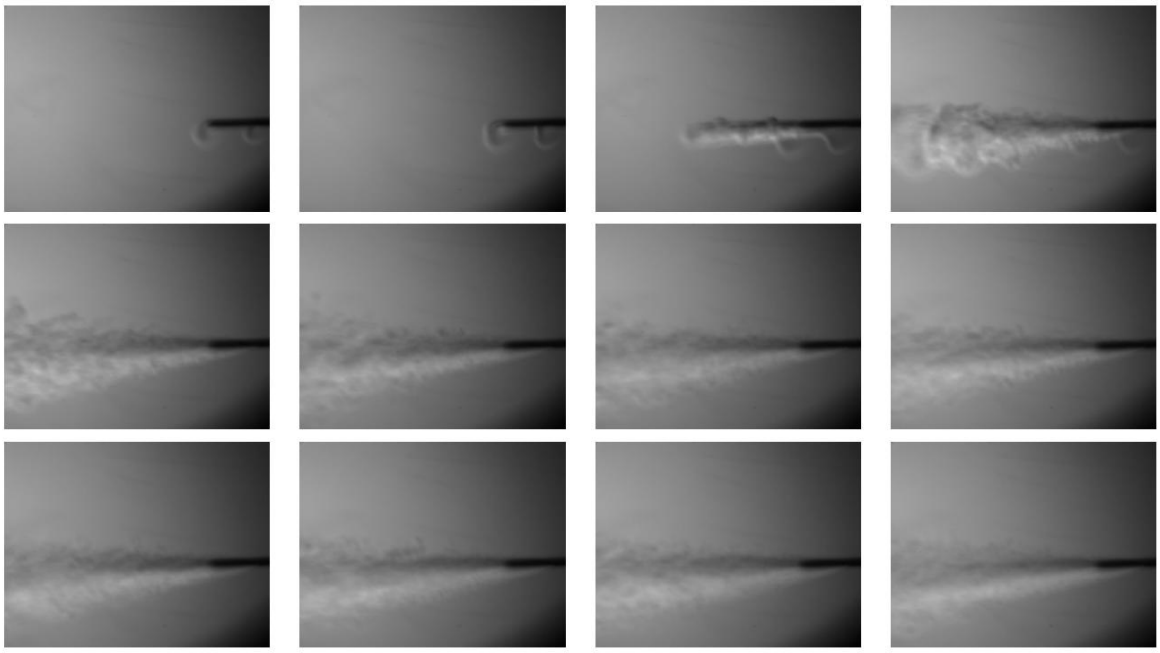


Figura 4. Secuencia de 12 fotogramas contiguos del experimento de aire comprimido adquiridos a 60 FPS.

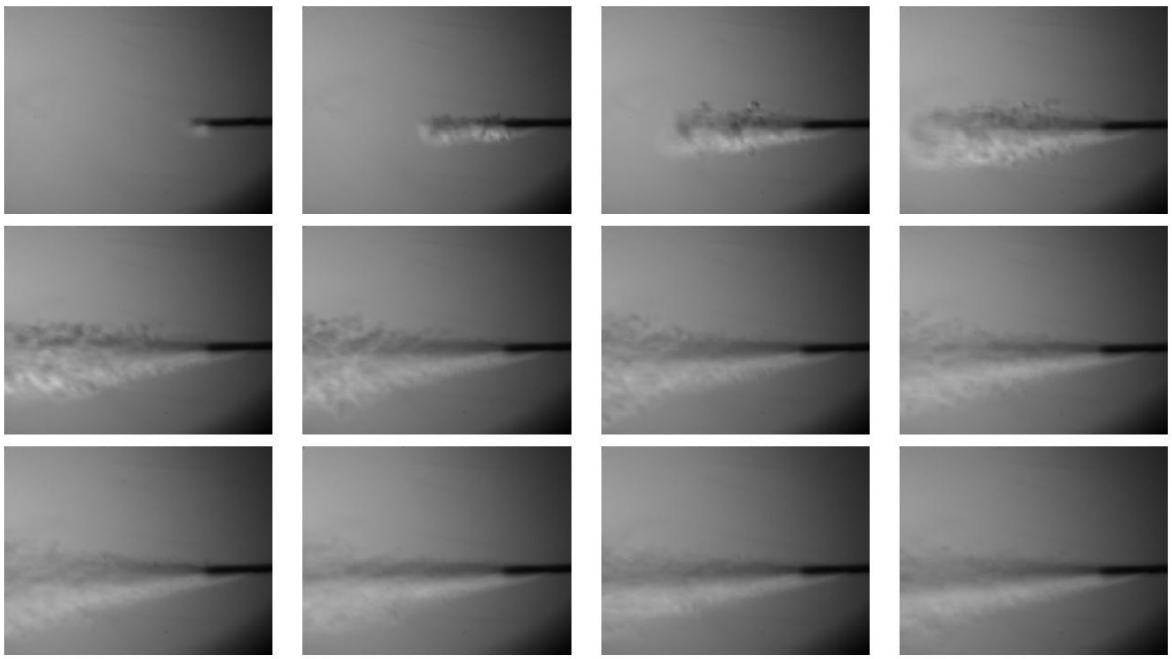


Figura 5. Secuencia de 12 fotogramas contiguos del experimento de aire comprimido adquiridos a 120 FPS.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema embebido de adquisición de imágenes que integra una cámara FLIR Flea3 y una Raspberry Pi mediante controladores ROS–FLIR. Se implementó un software de captura híbrido de captura, con control en C++ e interfaz en Python, lo cual permitió el ajuste dinámico de los parámetros del sensor. En particular, bajo una configuración de 1296 × 1004 px en modo Mono8, tiempo de exposición de 1423 µs, ganancia de 0 dB y nivel de negro de 1.46, el

sistema garantiza estabilidad radiométrica y flujos de datos reproducibles. Adicionalmente, la arquitectura bilingüe (C++/Python) equilibra eficientemente el rendimiento y la flexibilidad: mientras C++ asegura un control de bajo nivel sobre el hardware, Python facilita la integración con plataformas de análisis y futuras extensiones del sistema. Los resultados demuestran que el modo de 120 FPS mejora significativamente la resolución temporal al reducir el intervalo de muestreo a 8.3 ms, ideal para capturar transiciones rápidas. En contraste, el modo de 60 FPS ofrece una mayor estabilidad tonal y menor ruido, presentándose como la opción óptima para experimentos que demandan integridad visual frente a velocidad. En conjunto, el sistema propuesto constituye una plataforma robusta y flexible para aplicaciones de imagen científica en entornos embebidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. Litwiller, “CCD vs. CMOS: Facts and fiction”, Photonics Spectra, Vol. 35, 1, 2001, pp. 154-158.
2. K. Miikki, A. Karakoç, M. Rafiee, et al. “An open-source camera system for experimental measurements” SoftwareX, Vol 14, 2021, p. 100688.
3. S. Monk, *Raspberry Pi Cookbook* (O’Reilly Media, USA, 2022).
4. U. Teubner, H. J. Brückner, *Optical Imaging and Photography: Introduction to Science and Technology of Optics, Sensors and Systems*, (De Gruyter, Germany. 2019).

EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DE LA PRESA EL BOSQUE, DEL SISTEMA CUTZAMALA

Rosa Hilda Villegas Gaona[1], José Jaime Madrigal Barrera[2], Jorge Alejandro Ávila Olivera[3], Sonia Tatiana Sánchez Quispe[4], Rodrigo Mancera Partida[5]

[1,3,5] Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra UMSNH, [2,4] Facultad de Ingeniería Civil UMSNH.

1613856a@umich.mx

RESUMEN

El Sistema Cutzamala está conformado por una red de presas distribuidas en seis cuencas que abastece de agua a la Zona Metropolitana del Valle de México, una de las regiones con mayor demanda hídrica del país. Una de las principales presas del Sistema Cutzamala es la Presa El Bosque, que además de aportar agua al Sistema Cutzamala, también satisface la demanda de agua para diferentes usos en su cuenca de aportación, entre los que destacan el uso agrícola y abastecimiento público. La mayor parte de la cuenca de la Presa El Bosque, corresponde a la extensión territorial del municipio de Zitácuaro, Michoacán de Ocampo, el cual enfrenta de manera recurrente condiciones de estrés hídrico y sequías prolongadas.

En este contexto, resulta fundamental evaluar el impacto del cambio de uso de suelo, principalmente aquel derivado de las actividades agrícolas y la expansión de la frontera agropecuaria, en el comportamiento del ciclo hidrológico, mediante la aplicación de un balance hídrico que permita analizar las variaciones en la disponibilidad hídrica de la cuenca de la Presa El Bosque. Las transformaciones en el uso del suelo influyen directamente en los procesos de infiltración, escurrimiento y evapotranspiración, alterando el régimen hidrológico natural de la cuenca. Estos impactos no solo afectan a los habitantes de la cuenca, sino también a la población del Valle de México, dado su alto grado de dependencia hídrica del sistema Cutzamala, ocasionando deterioro de la seguridad alimentaria y crisis socioeconómicas. Para el desarrollo de este trabajo se realizó el balance hídrico de la cuenca de la Presa El Bosque con las indicaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, a partir del análisis del cambio de uso de suelo correspondiente a los años 1997 y 2025. Este análisis tuvo como finalidad contrastar la disponibilidad y la demanda hídrica a lo largo del tiempo, considerando la influencia de las actividades antropogénicas que han modificado de manera significativa la distribución del uso de suelo en la extensión territorial de la cuenca. Lo anterior permitió evaluar los efectos de dichas transformaciones sobre la dinámica hidrológica y la gestión del recurso hídrico en la región.

INTRODUCCIÓN

La presa del Bosque se encuentra localizada en el Municipio de Zitácuaro y tiene como cauce principal el río San Juan. Esta forma parte de un complejo sistema hídrico que tiene como función abastecer de agua a la zona metropolitana del Estado de México (Bunge et al., 2012). Su cuenca de aportación se encuentra entre los estados de Michoacán y México, y contribuye al suministro de agua para millones de habitantes, además de que satisface las necesidades de los sectores agrícola, pecuario y urbano de la región. Los cambios de uso de suelo asociados principalmente a la expansión de los asentamientos humanos y de las actividades agrícolas modifican significativamente las condiciones ambientales de la cuenca. Estas transformaciones influyen en procesos hidrológicos como la infiltración, el escurrimiento y la evapotranspiración, afectando la disponibilidad del recurso hídrico y el equilibrio natural del sistema.

Por ello, el presente estudio tiene como finalidad evaluar el impacto del cambio de uso de suelo sobre la dinámica hídrica de la cuenca de la Presa El Bosque mediante la aplicación de un balance hídrico conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015 y así poder determinar la influencia del cambio de

uso de suelo en el ciclo hidrológico de la cuenca. Para ello, se analizaron las condiciones de uso de suelo correspondientes a los años 1997 y 2025, con la finalidad de identificar las variaciones en la disponibilidad y demanda de agua, así como sus implicaciones para la gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

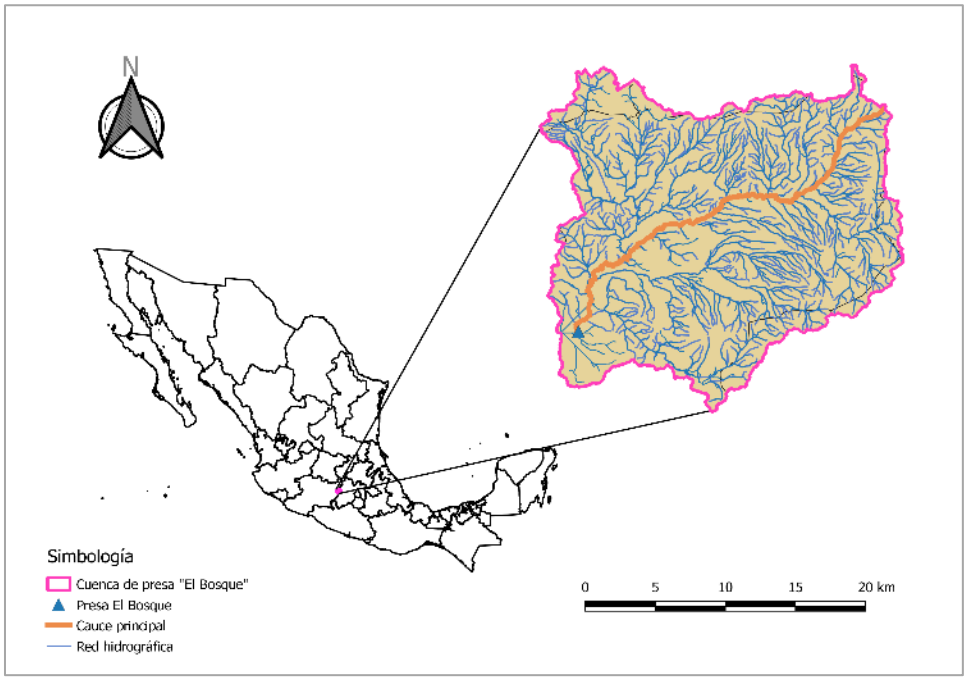


Figura 1. Cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia) ***Datos: INEGI.***

ZONA DE ESTUDIO

La extensión territorial de la cuenca es de 440 km^2 siendo el municipio de Zitácuaro el que concentra la mayor parte de la superficie de la cuenca, con una extensión de 391.635 km², equivalente al 89 % del área total. En menor proporción se encuentran los municipios de Donato Guerra, con 15.032 km² (3.42 %); Tuxpan, con 13.559 km² (3.08 %); Villa de Allende, con 9.365 km² (2.13 %); y Ocampo, con 9.205 km² (2.09 %). Por su parte, los municipios de San José del Rincón y Jungapeo presentan la menor participación territorial dentro de la cuenca, con superficies de 0.765 km² (0.17 %) y 0.456 km² (0.10 %), respectivamente.

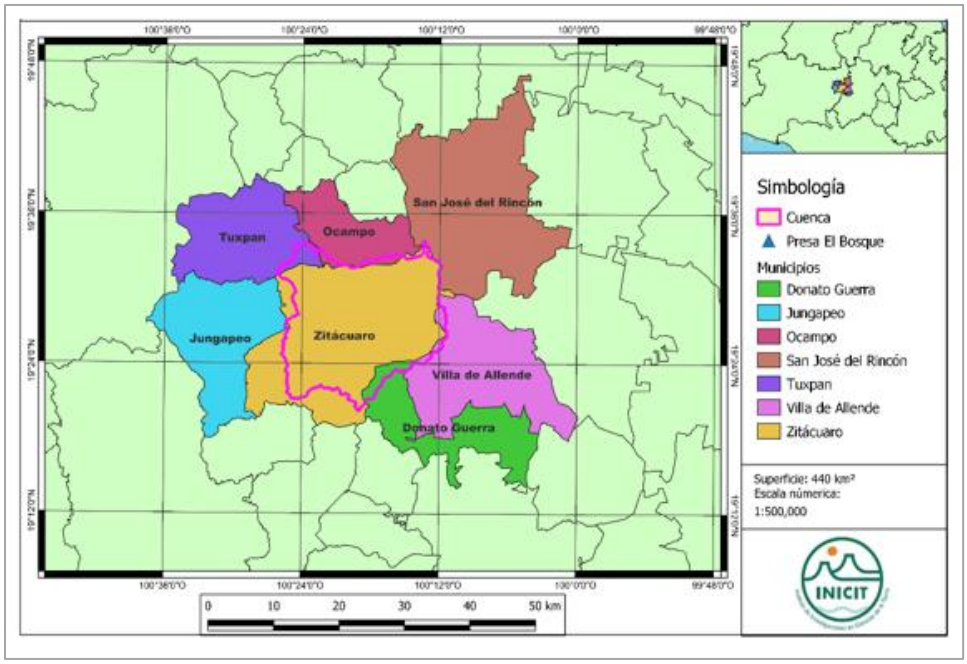


Figura 2. Mapa de municipios de la cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia) ***Datos: Conabio***.

En la cuenca de la Presa El Bosque predominan cuatro tipos principales de suelo. El andosol ócrico es el más representativo, con una superficie de 186.818 km², equivalente al 42.46 % del área total de la cuenca. Le sigue el acrisol húmico, que ocupa 59.828 km² (13.60 %), mientras que el acrisol órtico cubre 57.058 km², representando el 12.97 % de la superficie. Por su parte, el andosol húmico abarca 43.169 km², lo que corresponde al 9.81 % del territorio de la cuenca.

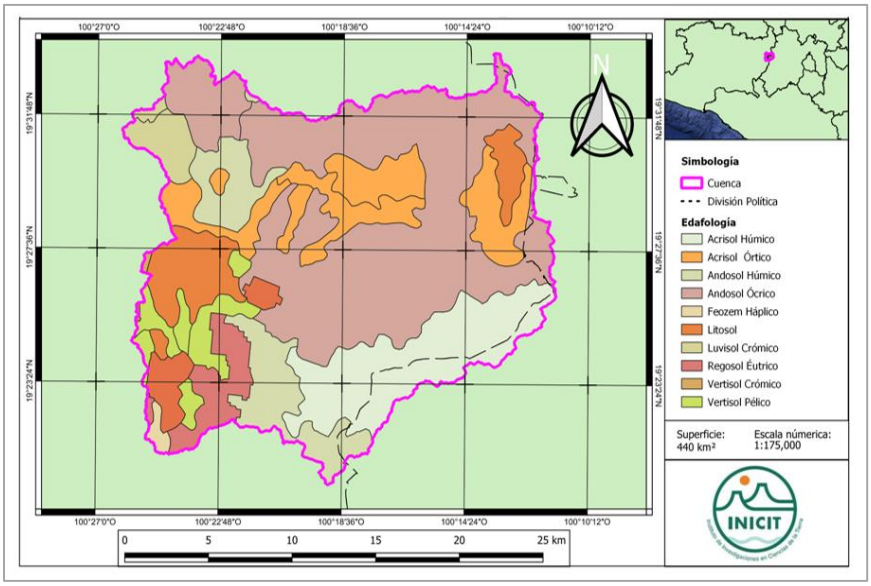


Figura 3. Mapa edafológico de la cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia)***Datos: CONABIO***.

En el año 1997, la vegetación natural constituyó la cobertura predominante dentro de la cuenca, ocupando el 57.37 % de la superficie total y estando integrada principalmente por comunidades forestales y vegetación secundaria. Las actividades agrícolas representaron el segundo uso de suelo más importante, con una participación del 40.22 % del territorio. Por su parte, los cuerpos de agua

cubrieron el 1.88 % del área de estudio, mientras que los asentamientos humanos registraron una ocupación de apenas el 0.54 %, reflejando una limitada expansión urbana durante ese periodo.

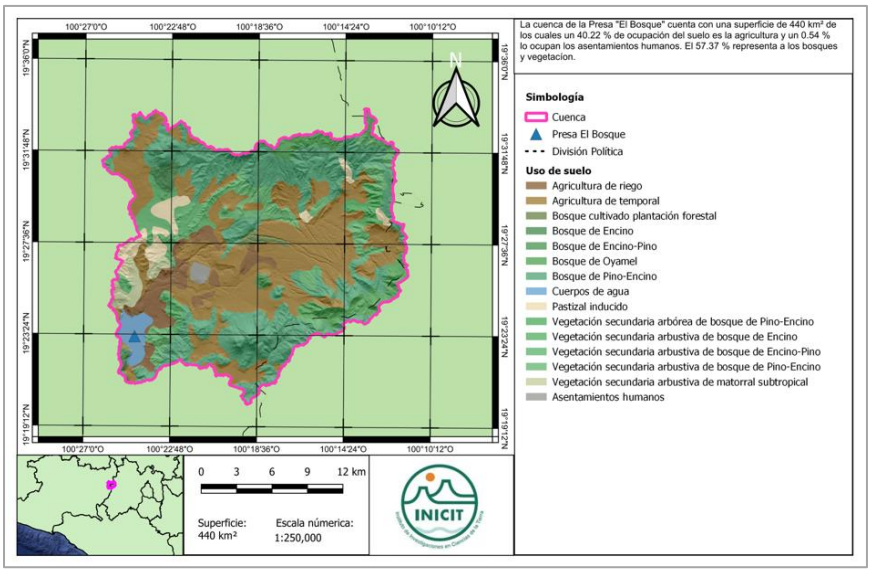


Figura 4. Mapa de uso de suelo del año 1997 de la cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia) ***Datos: CONABIO***.

En el año 2025, la cobertura vegetal natural representó el 51.67 % de la superficie total de la cuenca, predominando la vegetación secundaria arbustiva y los bosques de pino, encino y oyamel. Por otra parte, las áreas destinadas a actividades agrícolas ocuparon el 42.52 % del territorio, siendo la agricultura de riego anual y permanente, así como la agricultura de temporal anual y permanente, las categorías con mayor presencia dentro de la cuenca. El porcentaje restante correspondió a los asentamientos humanos, que abarcaron el 3.53 % de la superficie total, mientras que los cuerpos de agua representaron el 2.28 % del área de estudio (Figura 5).

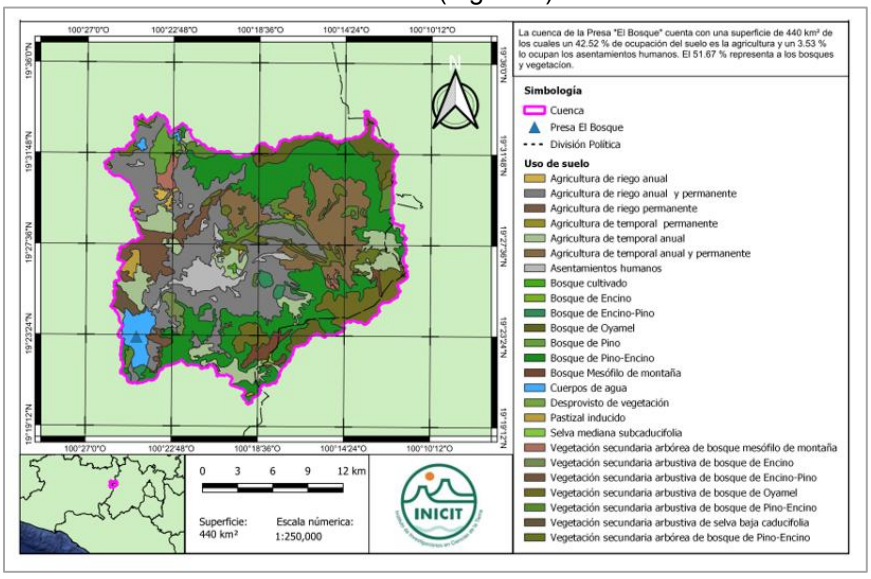


Figura 5. Mapa de uso de suelo del año 2025 de la cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia) ***Datos: CONABIO***

METODOLOGIA

Para elaborar este análisis se siguieron las especificaciones de la NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, “Conservación del recurso agua” que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Entre sus aplicaciones se encuentra la determinación del coeficiente de escurrimiento, parámetro que permite estimar la proporción de precipitación que se transforma en escurrimiento superficial según las características físicas y el uso de suelo de la cuenca.
Los parámetros para determinar el valor de K según el tipo y uso de suelo establecidos por la norma se muestran en la Tabla 1. Las características para la cuenca están indicadas en rojo.

Tabla 1. Valores de K, en función del tipo y uso de suelo.

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Fuente: SEMARNAT

Una vez realizado el procedimiento indicado por la norma para la determinación del coeficiente K para los usos de suelo analizados utilizando el sistema de información geográfico (QGIS), se aplicaron las restricciones establecidas en la Tabla 2 para poder determinar el coeficiente de escurrimiento anual (Ce). Los resultados K para el cálculo del Ce fueron:

1997
$$K = 0.2409$$

2025
$$K = 0.241$$

Tabla 2. Fórmulas para obtener el coeficiente de escurrimiento anual (Ce) según el valor de K.

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (Ce)
Si K resulta menor o igual que 0,15	Ce = K (P-250) / 2000
Si K es mayor que 0,15	Ce = K (P-250) / 2000 + (K-0,15) / 1.5

Fuente: SEMARNAT

Como para ambos casos el valor de K es mayor a 0.15, se utilizó la fórmula:

$$Ce = K(P - 250)/2000 + (K - 0.15)/1.5$$

Donde *P* es igual a la precipitación anual en mm.

Una vez calculados todos los coeficientes de escurrimiento anuales, se calculó el escurrimiento multiplicando la precipitación por el Ce. Una vez realizado el cálculo del escurrimiento, se determinaron la evapotranspiración y la infiltración mediante un balance de masas.

RESULTADOS

Una vez calculado el coeficiente de escurrimiento se determinó una precipitación de 852.26 mm para los años 1997 y 2025. Los resultados del balance hídrico muestran variaciones mínimas entre ambos escenarios (Tabla 2). La evapotranspiración pasó de 539.40 mm en 1997 a 539.36 mm en 2025, mientras que el escurrimiento aumentó ligeramente de 114.24 mm a 114.40 mm. Por su parte, la infiltración disminuyó de 198.61 mm a 198.49 mm. Estas diferencias son poco significativas y sugieren que los cambios de uso de suelo observados entre ambos periodos no modificaron significativamente el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Tabla 3. Resultados del balance hídrico (Elaboración propia).

Cuenca PEB	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Infiltración (mm)	Escurrimiento (mm)
1997	852.26	539.40	198.61	114.24
2025	852.26	539.36	198.49	114.40

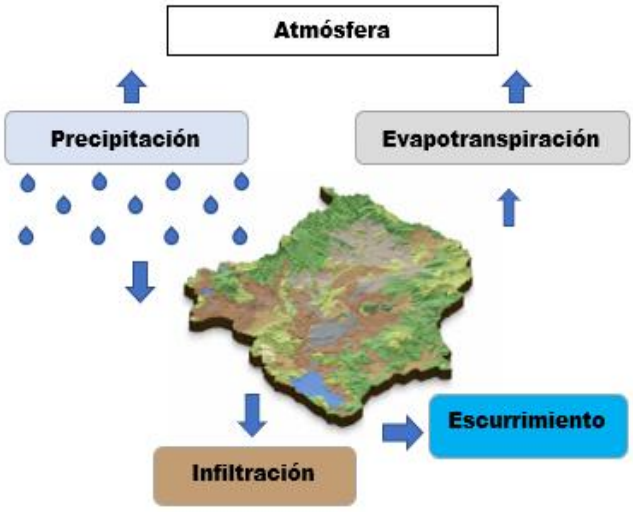


Figura 6. Esquema del balance hídrico de la cuenca de la Presa el Bosque (Elaboración propia).

CONCLUSIONES

El análisis comparativo del uso de suelo y del balance hídrico de la cuenca de la Presa El Bosque entre los años 1997 y 2025 permitió identificar cambios en la distribución de las coberturas terrestres. Durante este periodo, la superficie ocupada por vegetación natural disminuyó de 57.37 % a 51.67 %, mientras que el sector agrícola aumentó de 40.22 % a 42.52 %. Asimismo, la mancha urbana presentó el incremento más notable, pasando de 0.54 % a 3.53 % de la superficie total de la cuenca. Los cuerpos de agua también registraron un ligero aumento, al pasar de 1.88 % a 2.29 %.

A pesar de estas modificaciones en el uso de suelo, los resultados del balance hídrico no mostraron variaciones significativas en los parámetros analizados para ambos escenarios. Esto sugiere que los cambios observados en la cobertura del territorio no han sido lo suficientemente intensos como para generar alteraciones importantes en la dinámica general del ciclo hidrológico de la cuenca. Por lo tanto, los resultados obtenidos sugieren que las condiciones de escasez hídrica que se presentan en la región no pueden atribuirse únicamente al cambio de uso de suelo.

Lo que indica la probabilidad de que la problemática hídrica esté asociada a otros factores, tales como la variabilidad climática, el aumento de la demanda de agua, la ocurrencia de sequías prolongadas, la gestión del recurso hídrico o la presión ejercida por los distintos sectores usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bunge, V., Martínez, J., & Ruiz-Bedolla, K. (2012). Escenarios de la dinámica hídrica de la región de aporte del sistema Cutzamala". Documento de Trabajo de la Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.*, 1–42. http://inecc.gob.mx/descargas/cuencas/doc_trabajo_dinamica_hidrica_cutzamala.pdf
2. Conabio. (2023, March 10). *Portal de Información Geográfica - CONABIO*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
3. INEGI. (n.d.). *Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación*. Retrieved June 4, 2026, from https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/
4. SEMARNAT. (2013). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales NOM-161-SEMARNAT-2011,. *Diario Oficial De La Federación*, *8*(108), 18–61. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/402/cuencas.htm

SIMULACIÓN BASADA EN COMSOL DE UN SENSOR INTERFEROMÉTRICO DE FIBRA ÓPTICA

Leonardo Jahir Arévalo Bautista*, Romeo de Jesús Selvas Aguilar, Ricardo Chapa García y Diana Laura Martínez Molina

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
leonardo.arevalobt@uanl.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta la simulación numérica tridimensional de un sensor interferométrico Mach–Zehnder (MZI) basado en fibra óptica utilizando COMSOL Multiphysics. El dispositivo estudiado corresponde a una configuración SMF–TF–SMF, donde una sección de fibra con dimensiones reducidas permite el acoplamiento entre modos propagantes y la generación de interferencia modal. La simulación fue implementada mediante la interfaz Electromagnetic Waves, Beam Envelopes (ewbe), incorporando análisis modal, puertos numéricos, capas PML, mallado refinado y barridos paramétricos en longitud de onda. Los resultados obtenidos fueron exportados y procesados en Python para reconstruir el espectro de transmisión del interferómetro y compararlo cualitativamente con resultados experimentales obtenidos mediante un analizador de espectro óptico (OSA).

INTRODUCCIÓN

Los sensores interferométricos basados en fibra óptica representan una alternativa importante para aplicaciones de monitoreo y sensado debido a su inmunidad electromagnética, tamaño compacto y alta sensibilidad. Dentro de estas configuraciones, los interferómetros Mach–Zehnder implementados directamente sobre fibra óptica permiten analizar cambios en la propagación óptica mediante patrones de interferencia.

En una estructura tipo SMF–TF–SMF, una región de fibra con dimensiones reducidas modifica el confinamiento modal y favorece el acoplamiento entre modos del núcleo y modos del revestimiento. Como consecuencia, los distintos modos acumulan diferentes fases durante la propagación y generan máximos y mínimos en el espectro de transmisión.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo tridimensional del interferómetro utilizando COMSOL Multiphysics para estudiar la distribución del campo eléctrico, analizar el acoplamiento modal y obtener el espectro interferométrico del sensor.

METODOLOGÍA

Modelo geométrico

La geometría del interferómetro fue diseñada en SolidWorks y posteriormente importada a COMSOL Multiphysics mediante un archivo CAD tipo STEP. El modelo corresponde a una estructura SMF–TF–SMF compuesta por dos secciones de fibra monomodo estándar (SMF-28) y una región central de fibra adelgazada.

Las fibras SMF presentan un diámetro aproximado de núcleo de 10 μm y un revestimiento de 125 μm, mientras que la sección central reduce el diámetro efectivo del núcleo hasta aproximadamente 3.6 μm y el revestimiento hasta 80 μm.

Debido al elevado costo computacional asociado a la simulación tridimensional de una fibra óptica completa, se implementó una geometría escalada longitudinalmente. La longitud total del modelo simulado fue de aproximadamente 540 μm, conservando las relaciones geométricas necesarias para representar adecuadamente el fenómeno de propagación e interferencia modal.

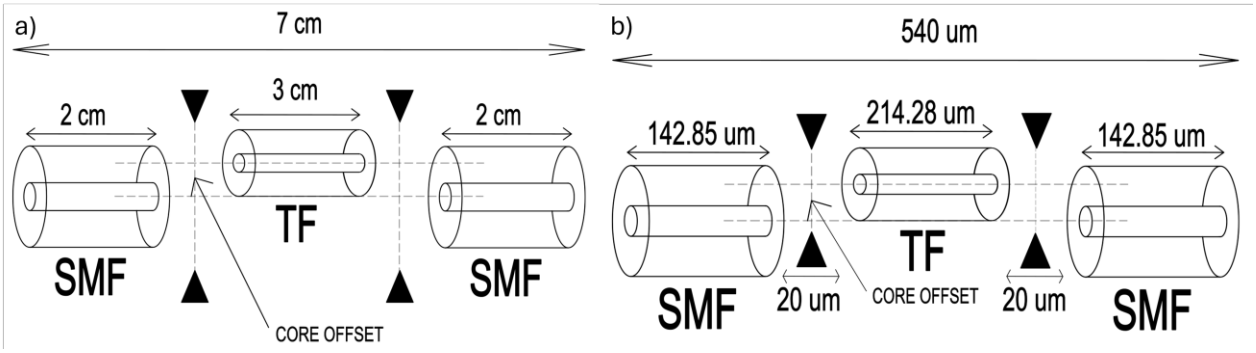


Figura 1: Comparación entre la geometría real y la geometría simplificada del interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica.

Importación y definición de materiales

Una vez importada la geometría en COMSOL, se verificó la continuidad de los dominios y la correcta definición de las interfaces entre núcleo, revestimiento y regiones externas. Esta verificación fue necesaria para evitar errores numéricos asociados al mallado o a la solución electromagnética.

Los índices de refracción asignados al modelo fueron n_core = 1.45 para el núcleo y n_cladding = 1.444 para el revestimiento y la región PML. La diferencia entre ambos índices permite representar el confinamiento de la luz dentro de la fibra óptica.

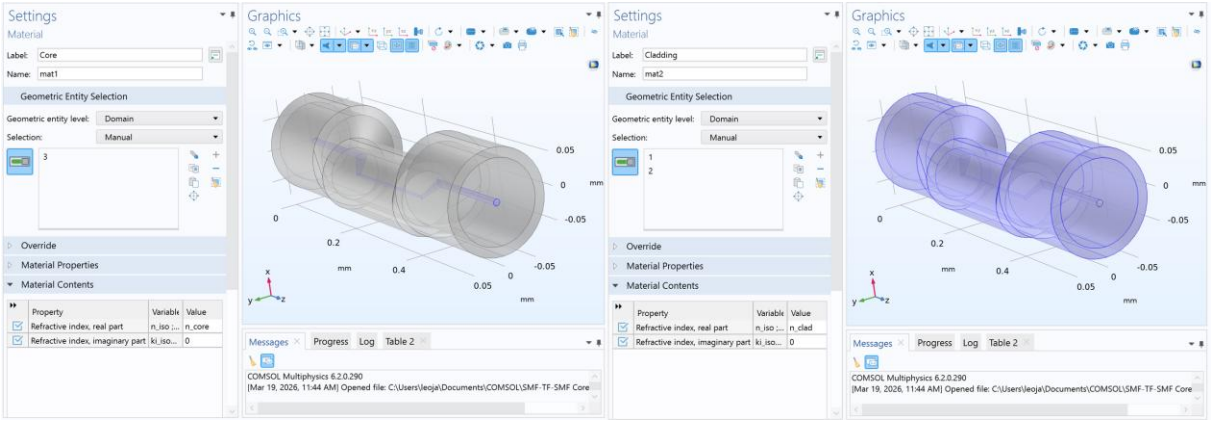


Figura 2: Asignación de materiales ópticos en el modelo tridimensional del interferómetro Mach-Zehnder implementado en COMSOL Multiphysics.

Modelo físico implementado

La propagación de la luz fue modelada mediante la interfaz Electromagnetic Waves, Beam Envelopes (ewbe) de COMSOL Multiphysics. Esta formulación permite separar la oscilación rápida de la fase óptica de la envolvente espacial del campo eléctrico, reduciendo considerablemente el costo computacional.

El estudio se configuró utilizando análisis modal y dominio de la frecuencia. Para ello se implementaron dos estudios de tipo Boundary Mode Analysis correspondientes a los puertos de entrada y salida, seguidos de un estudio Frequency Domain para resolver la propagación electromagnética a lo largo de toda la estructura.

En el puerto de entrada se excitó el modo fundamental de la fibra, mientras que el puerto de salida permitió calcular la potencia transmitida y los parámetros de dispersión del sistema, particularmente el parámetro S21.

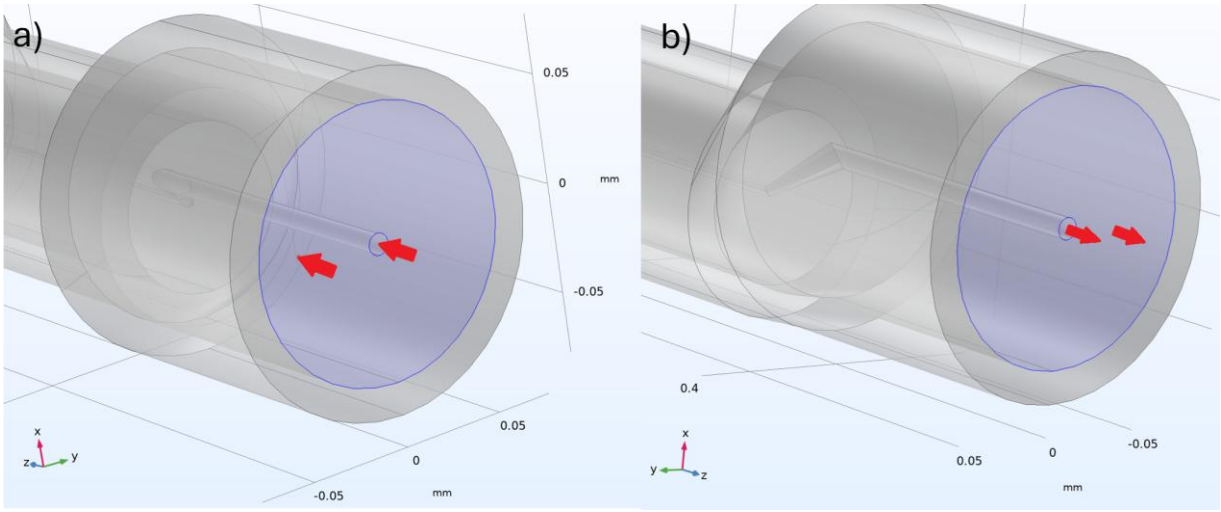


Figura 3: Definición de los puertos de entrada y salida utilizados en el modelo electromagnético del interferómetro.

Condiciones de frontera y mallado

Con el objetivo de evitar reflexiones artificiales en los límites del dominio computacional, se implementaron regiones tipo Perfectly Matched Layer (PML). Estas capas absorbentes permiten que los modos radiativos abandonen el dominio sin reflejarse nuevamente hacia la región de interés.

El dominio tridimensional fue discretizado mediante elementos finitos tetraédricos. Se utilizó un mallado refinado en el núcleo y en las interfaces núcleo–revestimiento debido a las elevadas variaciones espaciales del campo electromagnético en dichas regiones.

El mallado final empleado correspondió a una configuración tipo extra fino en el núcleo, más fino en el revestimiento y fino en la región PML. Este refinamiento permitió mejorar la estabilidad de la solución y reducir errores asociados a la factorización de la matriz dispersa durante el proceso de cálculo.

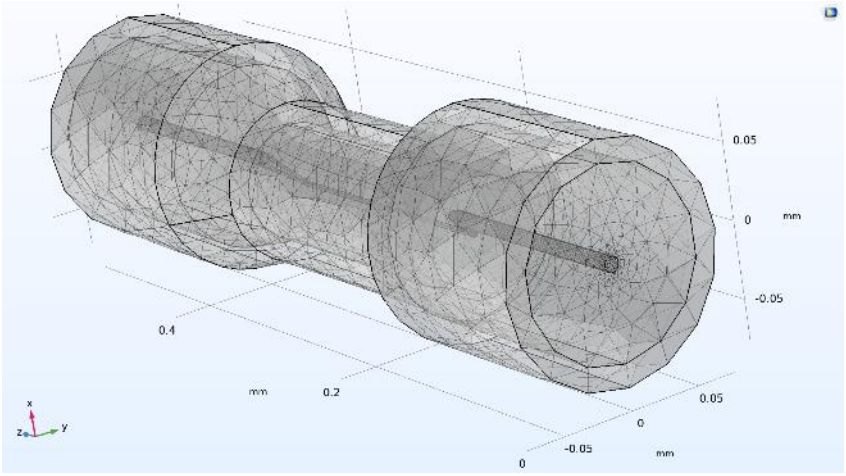


Figura 4: Mallado tridimensional del modelo del interferómetro Mach-Zehnder en COMSOL Multiphysics.

Barrido paramétrico

El estudio fue configurado mediante un barrido paramétrico en longitud de onda dentro del rango de 1.50 µm a 1.60 µm. Inicialmente se realizaron barridos con pocas longitudes de onda para verificar la estabilidad numérica del modelo; posteriormente se implementó un barrido más fino con aproximadamente 100 valores espectrales.

Cada solución calculada permitió obtener la distribución del campo eléctrico, los índices efectivos de propagación y los parámetros de reflectancia y transmitancia del interferómetro.

RESULTADOS

Distribución del campo eléctrico

La simulación permitió visualizar la propagación tridimensional del campo eléctrico a lo largo de la estructura interferométrica. En las regiones donde existe desplazamiento de núcleo (core-offset) se observó una redistribución significativa de la energía óptica hacia modos de revestimiento.

Este comportamiento confirma que la desalineación entre las secciones de fibra favorece el acoplamiento modal, permitiendo que diferentes modos acumulen distintas fases durante su propagación. La recombinación de dichos modos en la salida genera el patrón interferométrico característico del MZI.

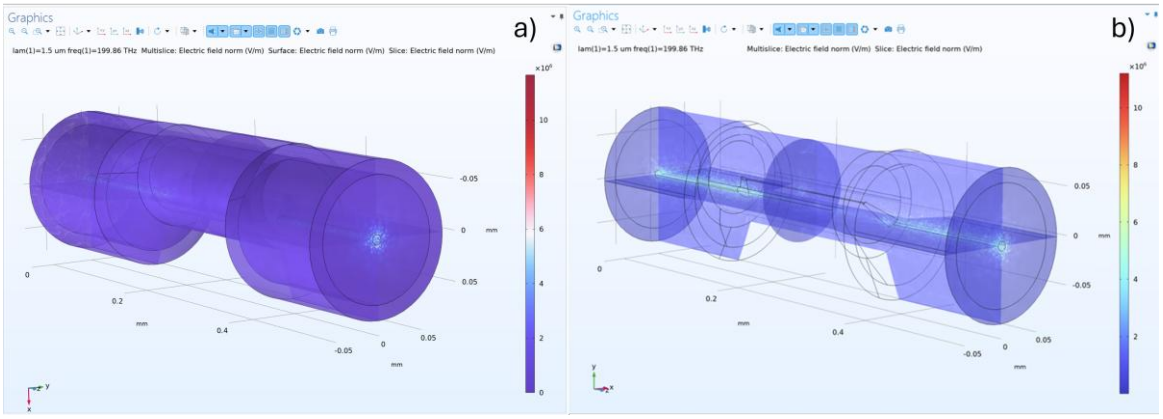


Figura 5: Distribución tridimensional del campo eléctrico |E| en el interferómetro Mach-Zehnder obtenida mediante COMSOL Multiphysics.

Espectro de transmisión simulado

A partir del parámetro S21 obtenido entre el puerto de entrada y el puerto de salida se reconstruyó el espectro de transmisión del interferómetro. La transmisión fue calculada en escala logarítmica utilizando la relación:

T(dB) = 20 log10(|S21|)

Los resultados generados en COMSOL fueron exportados en formato tabular, incluyendo longitud de onda, frecuencia, reflectancia, transmitancia y potencia óptica.

Posteriormente, la respuesta espectral fue ponderada mediante una envolvente gaussiana centrada en 1.55 µm con el objetivo de representar de manera más realista la distribución espectral de potencia de una fuente óptica experimental.

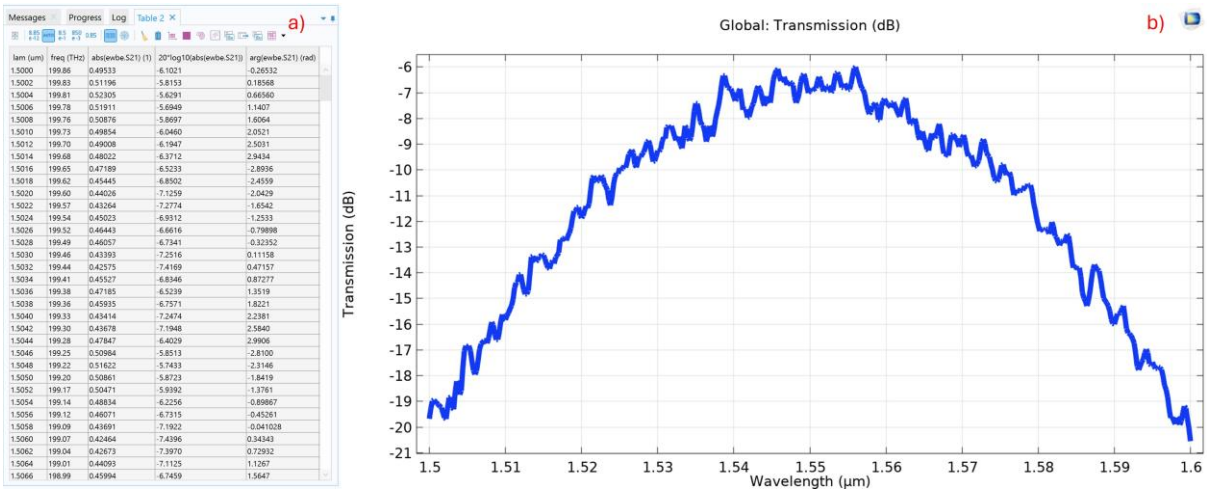


Figura 6: Resultados de transmisión obtenidos en COMSOL: a) tabla de datos generada durante el barrido espectral; b) espectro de transmisión simulado del interferómetro Mach-Zehnder.

Postprocesamiento en Python

Los datos exportados desde COMSOL fueron procesados posteriormente mediante Python. El postprocesamiento incluyó interpolación espectral, conversión a escala logarítmica en dB y aplicación de filtros gaussianos para reducir fluctuaciones numéricas presentes en la simulación.

Además, se aplicó una ventana tipo Tukey para suavizar los extremos del espectro y evitar discontinuidades artificiales en la señal.

Este procesamiento permitió obtener una representación espectral más cercana al comportamiento observado mediante un analizador de espectro óptico (OSA), conservando las modulaciones interferométricas principales del dispositivo.

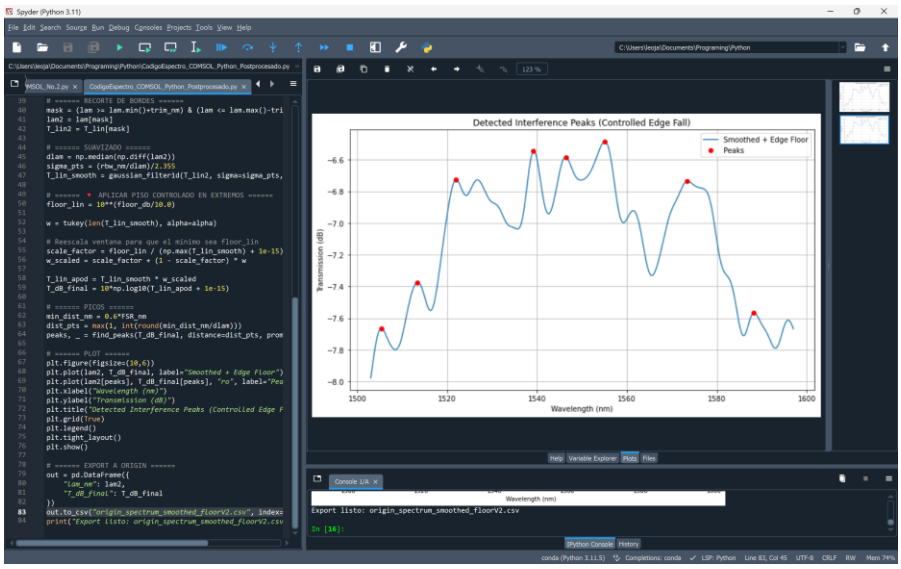


Figura 7: Espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante postprocesamiento en Python a partir de los datos exportados de COMSOL.

Comparación entre simulación y experimento

Finalmente, el espectro simulado fue comparado con el espectro experimental obtenido mediante un analizador de espectro óptico. La comparación mostró una concordancia cualitativa en la forma general de la envolvente espectral y en la presencia de máximos y mínimos asociados al fenómeno interferométrico.

Las diferencias observadas entre ambas respuestas pueden atribuirse a simplificaciones geométricas implementadas en el modelo, pérdidas por empalmes, curvaturas de la fibra, imperfecciones experimentales y variaciones reales del desplazamiento de núcleo.

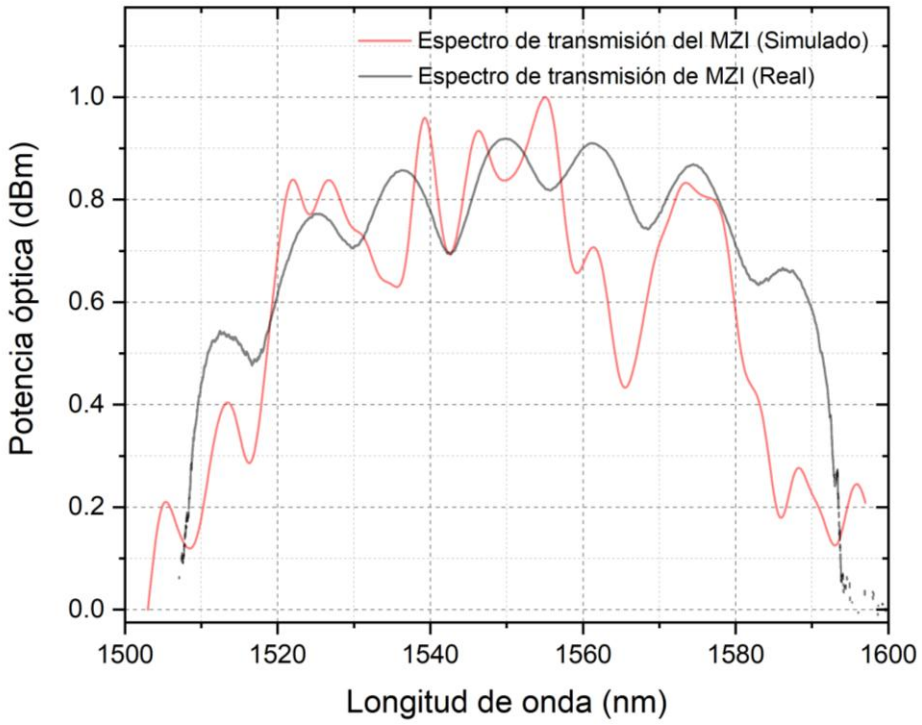


Figura 8: Comparación entre el espectro de transmisión del interferómetro Mach-Zehnder obtenido mediante simulación numérica y el espectro medido experimentalmente.

CONCLUSIONES

Se desarrolló exitosamente un modelo tridimensional del interferómetro Mach–Zehnder basado en fibra óptica utilizando COMSOL Multiphysics. El modelo permitió analizar la propagación del campo eléctrico, el acoplamiento modal y la respuesta espectral del sistema interferométrico.

La implementación de análisis modal, puertos numéricos, capas PML y barridos paramétricos permitió obtener una representación electromagnética funcional del dispositivo.

El postprocesamiento realizado en Python permitió reconstruir un espectro de transmisión comparable cualitativamente con los resultados experimentales obtenidos mediante OSA, validando el modelo numérico desarrollado.

Como trabajo futuro se plantea implementar modelos más complejos que incluyan deformaciones geométricas reales, pérdidas experimentales y variaciones del índice de refracción asociadas a aplicaciones de sensado químico y detección de gases.

BIBLIOGRAFÍA

[1] COMSOL Multiphysics® v. 6.2. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
[2] COMSOL AB. *Wave Optics Module User's Guide*. COMSOL Multiphysics Documentation, 2026.
[3] Snyder, A. W., & Love, J. D. *Optical Waveguide Theory*. Chapman and Hall, London, 1983.
[4] Okamoto, K. *Fundamentals of Optical Waveguides*. 2nd ed., Academic Press, 2006.
[5] Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. *Fundamentals of Photonics*. Wiley, 2007.
[6] Villatoro, J., & Monzón-Hernández, D. "Fast detection of hydrogen with nanofiber tapers coated with ultra thin palladium layers." *Optics Express*, vol. 13, no. 13, pp. 5087–5092, 2005.
[7] Liao, C. R., Wang, D. N., He, J., & Li, M. W. "Twisted optical fiber Mach–Zehnder interferometer for temperature sensing." *Optics Letters*, vol. 36, no. 4, pp. 571–573, 2011.
[8] Silva, S., Pachon, E. G., Franco, M. A. R., Jorge, P., & Baptista, J. M. "Mach–Zehnder interferometer based on tapered optical fiber for refractive index sensing." *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 93–97, 2012.
[9] Erdogan, T. "Fiber grating spectra." *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
[10] Marcuse, D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. 2nd ed., Academic Press, 1991.
[11] Yariv, A., & Yeh, P. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*. Oxford University Press, 2007.
[12] Kashyap, R. *Fiber Bragg Gratings*. Academic Press, 1999.
[13] Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley, 2010.
[14] Rao, Y. J. "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors." *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 297–324, 1999.
[15] Li, E., Wang, X., & Zhang, C. "Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes." *Applied Physics Letters*, vol. 89, no. 9, 2006.

ANÁLISIS MOLECULAR DE TEQUILAS POR TÉCNICA SERS

Julio C. Chávez Pardo, Roberto Y. Sato Berrú, M. Esther Mata Zamora, América R. Vázquez Olmos y Elsi V. Mejía Uriarte.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autnoma de México,Ciudad Universitaria
418013818@quimica.unam.mx

RESUMEN

El tequila es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído, derivados de las cabezas de Agave de la especie *tequilana Weber* variedad azul, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no. Es un líquido que puede tener color, cuando se ha madurado, abocado, o añadido de un color específico. Existen dos categorías de tequilas: 100 % agave y tequila, de los cuales, existen cinco clases diferentes: Blanco o plata, Joven u oro, Reposado, Añejo y Extra añejo. La producción de tequilas está regulada por el Consejo Regulador del Tequila y la Denominación de origen, que contempla los estados donde se produce el tequila.

En este trabajo, se enfatiza en tequilas 100 % agave, seleccionando tres clases: blanco, reposado y añejo, además se incluyó una variedad comercial denominada: cristalino. En la primera parte del trabajo se pone a prueba la capacidad reductora *in situ* de las moleculas presentes en los tequilas para generar nanopartículas de plata por medio de la técnica de síntesis verde. Esto, con la intención de analizar las moleculas presentes en el tequila debido a los diferentes tiempos de almacenamiento en barricas de roble o encino, dejando a un lado el etanol y el agua, que son considerados como los componentes principales en esta bebida alcohólica. Una vez generadas las nanopartículas de plata *in situ*, se realizó la caracterización por técnicas espectroscópicas como UV-Vis y por espectroscopía Raman con un láser de 532 nm, en el que se evalúo la presencia de fluorescencia emitida por las moléculas orgánicas. Posteriormente, se evaluaron los espectros de tequilas con las nanopartículas de plata generadas por la interacción entre los iones de plata y las moleculas presentes en el tequila. Los espectros Raman (SERS) obtenidos presentaron señales definidas, los cuales se procedieron a realizar su interpretación, asignando las vibraciones de los grupos funcionales correspondientes a las moléculas responsables de acuerdo con cada clase de tequila. Así mismo, con el objetivo de relacionar las posibles moléculas responsables de generar las nanopartículas de plata en el mismo. Dichas moléculas se consultaron en la literatura ya publicada en el que se han analizado a los tequilas por otras técnicas analíticas. Los espectros teóricos se generaron con el software de simulación vibracional Gaussian procediendo posteriormente a la correlación espectral, delimitando el estudio solo en la región de huella dactilar. Con esto, se dio un primer acercamiento con la técnica SERS que brindó resultados óptimos en el análisis de tequilas donde existe una mezcla de moléculas orgánicas.

INTRODUCCIÓN

El tequila es una bebida alcohólica regional mexicana, que se obtiene a partir de las cabezas de agave *Tequilana Weber* variedad azul. Es un líquido que, de acuerdo con su clase, es incoloro o coloreado cuando es madurado o cuando es abocado, o añadido de un color especifico. Esto significa que puede ser blanco (incoloro) o tener color debido al proceso de maduración de barrica (reposado, añejo o extra añejo) [3].

La elaboración de tequilas en México está sujeta a la planta de la cual es la materia prima y de ella depende la obtención del producto final, este es uno de los factores principales por el cual, el tequila se hizo acreedor a la Denominación de Origen del Tequila (DOT) que está regulada por la NOM-006-SCFI-2012. Entre los factores que se consideran en la elaboración del tequila es el nivel de

maduración del agave, que requiere entre 5 y 8 años para alcanzar las concentraciones máximas de azúcares. Durante el periodo de crecimiento, las plantas están sujetas a labores de barbecho, es decir, cortar las puntas de las hojas para fomentar el crecimiento de la piña. El cultivo y cuidado del agave se realiza a mano, con métodos tradicionales que han transmitido de generación en generación [4]. Los azucares presentes en el agave, son la única fuente de alcohol que se utiliza para obtener el tequila. Para obtener los azucares, es necesario, hidrolizar la inulina contenida en el agave mediante un proceso de cocción para obtener las fracciones de azucares simples (fructosa y glucosa). Las etapas posteriores y la destilación para obtener el tequila se encuentran bien establecidas. Sus propiedades características en sabor, color y aroma se deben a gran variedad de compuestos volátiles, entre los que figuran alcoholes superiores, aldehídos, ácidos grasos, ésteres, compuestos azufrados y compuestos fenólicos [5].

La composición molecular en los tequilas en las diferentes etapas de su producción se han estudiado por diversas técnicas analíticas como, cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con arreglo de diodos (DAD) [6], cromatografía de gases con acoplamiento a espectrometría de masas [7], espectroscopía UV-Vis [8], espectroscopía de fluorescencia [9], espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) [10], voltametrías y técnicas electroquímicas [11] que se han aplicado para analizar moléculas a través de las diferentes etapas de producción, por ejemplo, la maduración en barricas. También se ha realizado el estudio espectral de las vibraciones moleculares en los tequilas aplicando técnicas quimiométricas, que han aportado información más frecuentemente al análisis de compuestos volátiles: metanol, acetato de etilo, etc. [10].

En trabajos previos al presente estudio, la espectroscopía Raman se aplicó al análisis de marcadores de maduración utilizando láseres con longitudes de onda 532 y 785 nm [12] y un estudio cualitativo para evaluar el contenido alcohólico [13]. En ambos estudios se analiza la presencia de vibraciones simétricas y asimétricas asociadas a etanol, agua y otras que podría atribuirse a otro tipo de moleculas sin profundizar en su posible identidad.

Dicho lo anterior, se plantea la posibilidad de usar la técnica SERS como una alternativa para ofrecer una herramienta de análisis y un medio para validar la autenticidad, calidad y una posible diferenciación de clases de tequila. Esto se lleva a cabo con la síntesis verde de nanopartículas de plata generadas *in situ* en el medio, sin otro agente reductor que la presencia de las moléculas en el tequila. Dichas nanopartículas se generarán por medio de reacción de oxido–reducción, en presencia de una sal precursora ($AgNO_3$) y las moléculas presentes en el tequila, como agentes reductores. Este trabajo va en dirección a analizar las moléculas presentes en concentración traza en el tequila cuyo origen se debe tanto al proceso de destilación como al efecto de almacenamiento en barricas de madera.

Cabe mencionar que la emisión de fluorescencia por parte de las moléculas orgánicas fueron un factor a considerar, ya que se utilizó un láser de longitud de onda de 532 nm en la obtención de los espectros Raman. Al aplicar la técnica SERS, los espectros obtenidos mostraron señales de vibraciones mejor definidas, evidenciando un primer acercamiento a la posible identificación de grupos funcionales como: fenoles, alcoholes, ésteres, ácidos, terpenos y cetonas.

La posible identificación molecular de los espectros experimentalmente obtenidos se realizó comparándolos con espectros teóricos obtenidos mediante el uso del lenguaje de programación Python y un código que realiza las siguientes actividades. Suavizado en espectros experimentales (eliminación de ruido del equipo y fluorescencia), normalización, emparejamiento en el número de datos, correlación de señales por intensidad y corrimiento Raman, similitud de espectros, correspondencia y asignación de un pico teórico con un experimental, delimitando el análisis a la región de huella dactilar (400– 1800 cm^{-1}). Los espectros teóricos fueron generados por el software Gaussian 09W, consultando información de trabajos previos de autores que han realizado estudios similares en la identificación de moléculas por medio de estas herramientas [14] y [15]. Las moléculas propuestas en este trabajo se buscaron en la base de datos “Pubchem”, en los cuales se obtiene el formato SDF, es decir, se conocen las coordenadas de estas moléculas para obtener así los espectros Raman teóricos. Como respuesta de dicho procedimiento, se obtiene una base de datos

brindando las cinco moléculas (espectros teóricos) que mayor similitud presentan con cada espectro experimental sometido a análisis.

TEORÍA

La espectroscopía Raman se basa en la dispersión inelastica de la luz por una molécula. La molécula se excita al interactuar con la luz incidente, distorsionando la nube electrónica. Cuando la luz incidente causa movimiento durante el proceso de dispersión, se produce transferencia de energía entre la molécula y el fotón. Este proceso se llama dispersión inelástica o dispersión Raman [16]. El efecto de dispersión Raman mejorado por superficie (SERS) produce señales Raman significativamente amplificadas. La amplificación se debe principalmente a una intensificación de los campos electromagnéticos en las proximidades de las superficies metálicas nanoestructuradas, mejorando las señales Raman de los analitos a través de la mejora de plasmones superficiales, permitiendo la detección de moleculas objetivos [17].

Python es un lenguaje de programación, es decir, es un conjunto de instrucciones que, combinadas apropiadamente, permiten escribir programas que son entendibles y ejecutables en una computadora. Python trabaja con un intérprete, esto quiere decir, que los programas se evalúan mientras se ejecutan o se revisan en tiempo real. Este tipo de lenguaje es multiparadigma. Que sea multiparadigma significa que con este lenguaje se pueden construir programas con enfoques diferentes, a saber: enfoque funcional, enfoque imperativo (almacenamiento de memoria principal) y enfoque orientado a objetos (unión entre atributos, que son características de las cosas u objetos, y los métodos que son los usos que pueden tener dichas cosas u objetos) [18].

Gaussian 09W es considerado un software para el uso de la química teórica, es un programa que ejecuta la variedad de cálculos de estructura electrónica. Capaz de predecir muchas propiedades moleculares y reacciones químicas, incluyendo: energías y estructuras moleculares, energías y estructuras de estados de transición, frecuencias vibracionales, espectros infrarrojo y Raman, propiedades termodinámicas, energías de reacción y de enlace, orbitales moleculares, cargas atómicas, apantallamiento en RMN, afinidad electrónica y potenciales de ionización, polarización, etc. [19]

PARTE EXPERIMENTAL

A continuación, se enlistan el material necesario para llevar a cabo la parte experimental:

- Tequilas blancos: envasado inmediatamente después de su destilación o sometido a un proceso de añejamiento no mayor a dos meses.
- Tequilas reposados: almacenado en reposos por dos meses hasta un año en contacto directo con la madera de la barrica de roble blanco o encino.
- Tequila añejo: almacenado en reposo por uno a tres años en contacto directo con la madera de la barrica de encino o roble blanco.
- Tequila cristalino: ha tenido un proceso de maduración en barrica idéntico al tequila añejo, pero tiene una etapa adicional que consiste en realizar una filtración con carbón activado.
- Nitrato de plata ($AgNO_3$) Sigma-Aldrich 99.0 %
- Papel aluminio grado analítico.

Biosíntesis de las nanopartículas de plata

En 5 ml de tequila se añaden 0.04246, 0.00085 y 0.00042 g de nitrato de plata (10^{-2}, 10^{-3} y 10^{-4} M), se homogeniza y se expone a una fuente de luz blanca por media hora con el fin de acelerar la formación de las nanopartículas de plata. El análisis por las diferentes espectroscopías se realiza en los tequilas sin y con nanopartículas de plata.

El análisis por espectroscopía UV-visible se realizaron en un espectrómetro Cary 5000 UV-visible-NIR de la marca Agilent Technologies® de doble haz. Las muestras de tequilas se colocan en

cubetas de cuarzo de 1 cm de camino óptico, sin diluir. El intervalo de medición fue de 200 nm a 800 nm.

El análisis por espectroscopía FTIR de los tequilas sin y con nanopartículas de plata se realizaron en un espectrómetro Nicolet® modelo is50R con el aditamento de ATR Smart-iTX de una sola reflexión en cristal de diamante. Las muestras de tequila se depositan sobre la ventana del aditamento ATR (gota de 1 µl) y se dejan secar para obtener el espectro de los residuos sólidos. Los espectros se adquirieron con una resolución de 4 cm^{-1}, 32 barridos y un intervalo de 4000 cm^{-1} a 525 cm^{-1}.

En la obtención de los espectros Raman se utilizó un microscopio confocal Raman de la marca Oxford Instruments-WITec®. Las muestras se preparan colocando una gota (1 µl) sobre una superficie de aluminio y se dejan secar. Los espectros se colectan usando un objetivo de 100X, 0.2 segundos de tiempo de integración y 2 acumulaciones. Con un láser de 532 nm y una potencia de 1 mW.

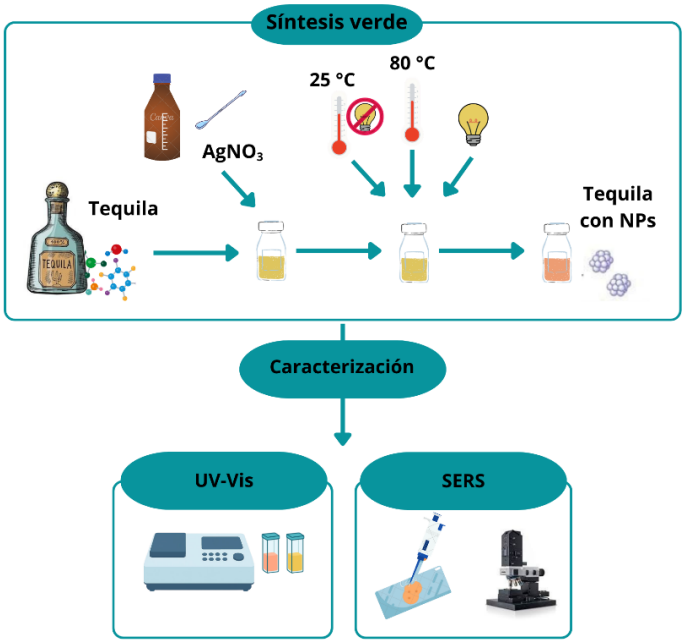


Figura 1. Metodología para la síntesis de nanopartículas de plata usando tequila como uno de los agentes en la reacción oxido-reducción y técnicas de caracterización espectroscópica (Autoría propia, 2026).

Mediante el software Gaussian se realizó el análisis de optimización y frecuencia, con el modelo matemático DFT, aplicando “Default spin” y B3LYP / 6-311G para obtener el espectro teórico Raman de cada molécula. Una vez generados los espectros con el software Gaussian 09W, se procede, con ayuda del lenguaje de programación de códigos “Python”, y el uso de una interfaz de desarrollo interactivo y de código abierto, llamado “Jupyter lab”, haciendo uso de “Jupiter Notebook” se desarrollan los códigos con el uso de la inteligencia artificial.

RESULTADOS

De acuerdo con las imágenes presentadas en la figura TAL, haciendo un comparativo de los tequilas nates y después de la síntesis de nanopartículas de plata. Lo primero a considerar es un cambio de color en cada una de las muestras de tequila. Cabe decir que los tequilas reposado y añejo, cambiaron de un color ámbar característico a un tono naranja-marrón. En cuanto a los tequilas blanco

y cristalino, pasan de ser incoloros a tener una coloración rosa-violeta. Estos cambios se atribuyen a la formación de los coloides de plata de tamaño diferenciado del [18] y concentración de las moléculas presentes en el tequila por el tiempo de maduración en barrica. En el caso particular del tequila cristalino hay que recordar que se trata de un tequila añejo al que se le ha dado un proceso de filtración en carbón activado, lo cual supone la eliminación de algún tipo de moléculas que como se verá en los espectros UV-visible, posiblemente sean flavonoides [19].

Espectros UV-Vis

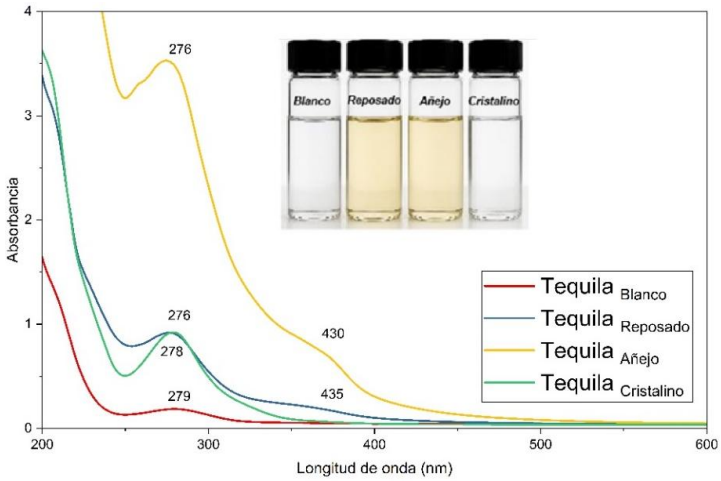


Figura 2 . Espectro UV-Vis de tequilas 100 % agave (Autoría propia, 2026).

Los espectros UV-Vis de los tequilas 100 % agave sin nanopartículas presentan diferentes maximos de absorbancia, para esto, el tequila blanco y cristalino presentan una banda en 279 y 278 nm, respectivamente. Que pertenece a la transición electrónica de π→π* de polifenoles. En cuanto a los tequilas reposado y añejos, presentan dos bandas de absorbancia, la banda de polifenoles en 276 nm y la segunda se observa en 435 y 430, respectivamente. Esta banda se asocia a la presencia de flavonoides, misma que se atribuye a moléculas provenientes de la barrica de madera donde fue añejado el tequila [20].

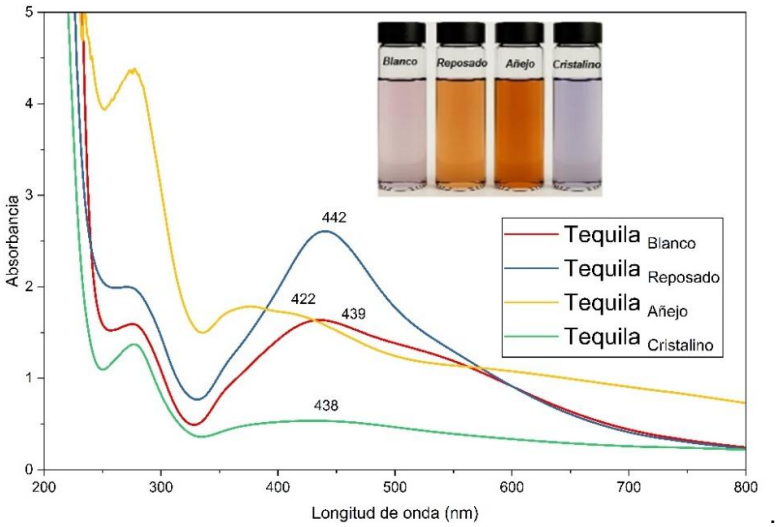


Figura 3. Espectro UV-Vis de tequilas con nanopartículas de plata (Autoría propia, 2026).

Los espectros UV-Vis presentan la señal plasmónica, es decir, tienen una banda de absorción con un máximo de absorbancia alrededor de los 430 nm y por la anchura de la banda se infiere que la posible morfología de las nanopartículas presentes sean esferas o esferoides. Cabe mencionar que, respecto a Yu y colaboradores, la absorbancia de la señal plasmónica de nanopartículas de plata se observa entre 400 a 600 nm, con lo que coincide con el rango de las señales obtenidas en este trabajo.

Espectroscopía Raman

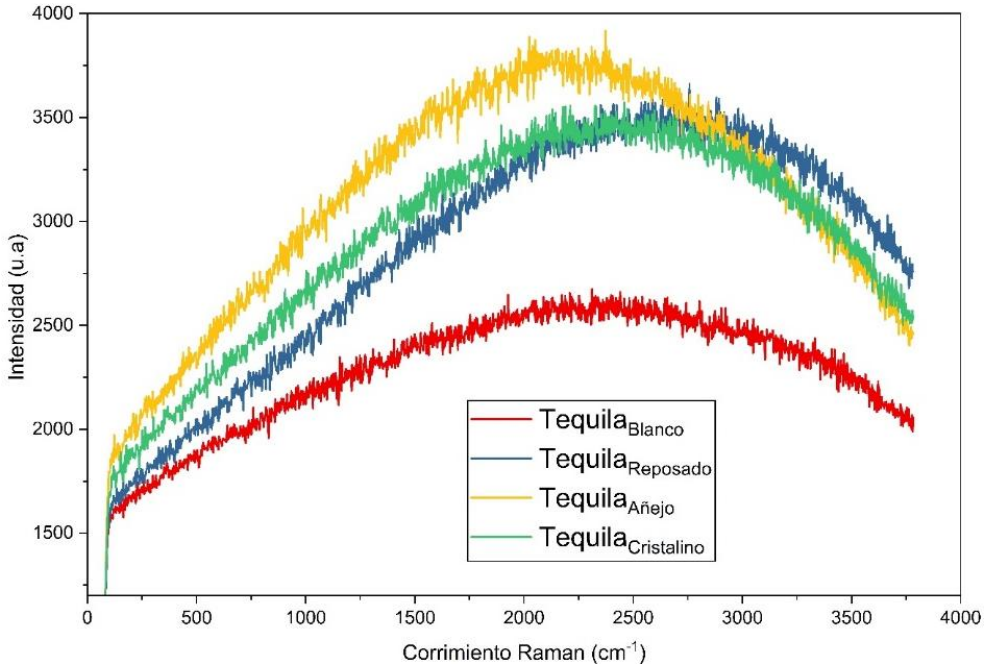


Figura 4. Espectro Raman de tequilas (Autoría propia, 2026).

La espectroscopía Raman en tequilas, la presencia de fluorescencia es evidente, esto es debido a las moléculas orgánicas no volátiles provenientes de las diferentes etapas del proceso de elaboración del tequila. Cabe resaltar que la intensidad de la señal de fluorescencia es mayor conforme el tequila se ha sometido al proceso de maduración en barrica, siendo el tequila blanco el de menor intensidad a comparación del tequila añejo que presenta mayor intensidad por su prolongada maduración en barrica (1 a 3 años).

Espectros SERS

Cabe mencionar que, por cada zona analizada en cada clase de tequila con nanopartículas de plata, se obtuvieron un total de 400 espectros. Esto en un área de análisis: 20 x 20 µm, de los cuales se hizo su posterior selección

- Tequila blanco.

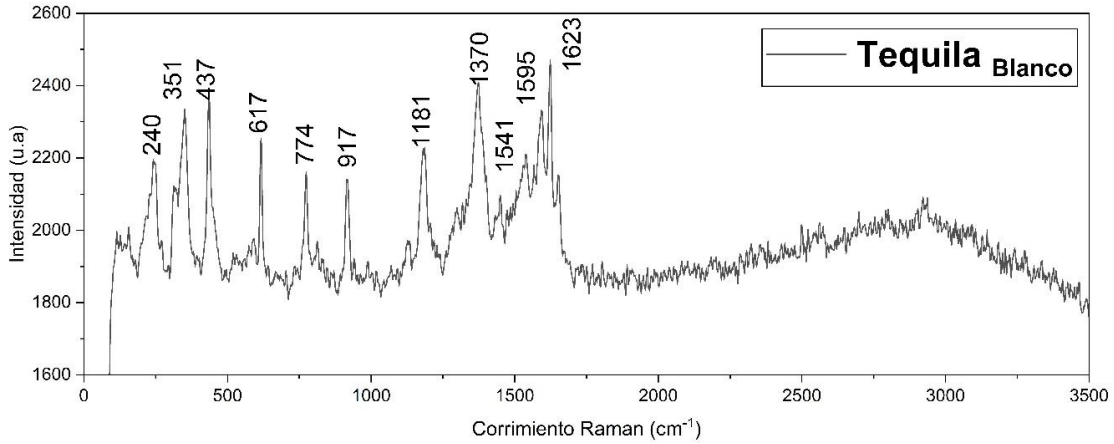


Figura 5. Espectro SERS de tequila blanco (Autoría propia, 2026).

La identificación de vibraciones moleculares en el tequila blanco es: ν C=O, ν C=C, δ_s CH_3 y COO^-, ν C-O, δ C-H ip, ν C-C, δ C-O-C, δ C-C / C-S y ν metal-molécula. Las vibraciones se pueden relacionar la presencia de grupos funcionales, como: azufrados, ácidos, ésteres, compuestos furánicos y terpenos. Cabe mencionar la presencia de la vibración del metal con las moléculas del tequila.

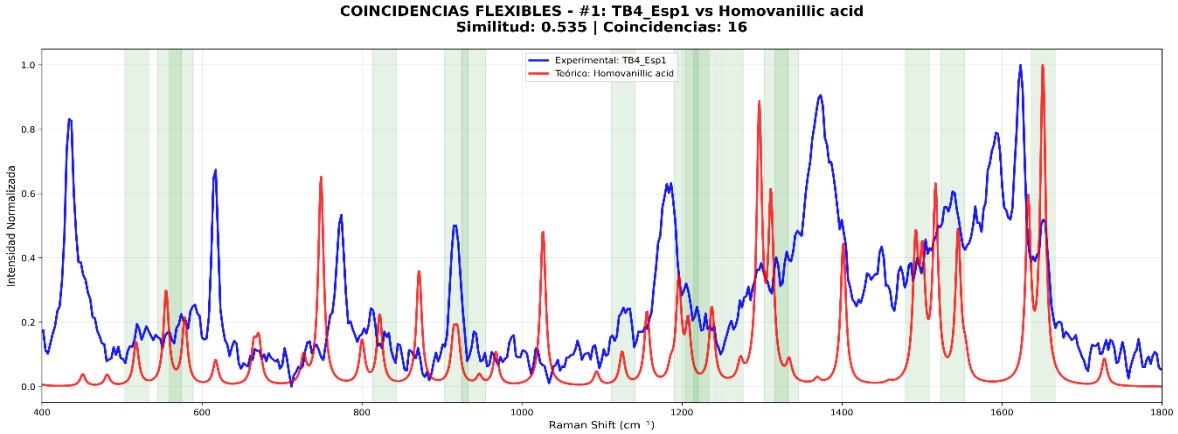


Figura 6. Correlación de ácido homovanílico con tequila blanco (Autoría propia, 2026).

El resultado que proporcionó Python para el tequila blanco fue el ácido homovanílico, con un porcentaje de similitud de 0.535 y 16 coincidencias de señales entre ambos espectros, lo cual nos indica que dicha molécula es la mejor se asocia al espectro experimental.

- Tequila reposado.

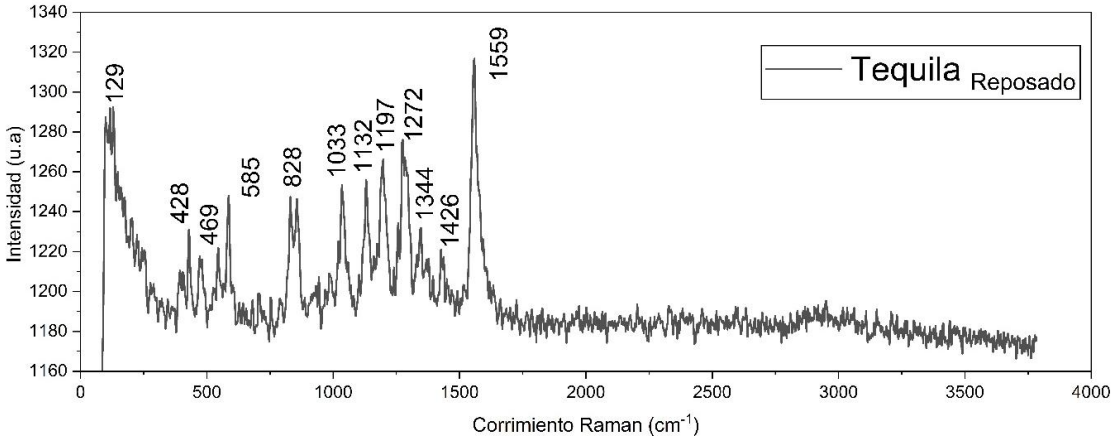


Figura 7. Espectro SERS de tequila reposado (Autoría propia, 2026).

Las vibraciones moleculares identificadas en el tequila reposado son v C=C, δ_s CH_3, COO^-, δ C-H ip, v_{as} C-O, v_s C-O, v C-C, δ C-O-C, v C-O-C, δ C-H oop, δ C-C / C-S y v metal-molécula.
Estas vibraciones se atribuyen a grupos moleculares azufrados, aldehídos, éteres, ácidos, ésteres, terpenos, lactonas, fenoles y compuestos aromáticos y furánicos.

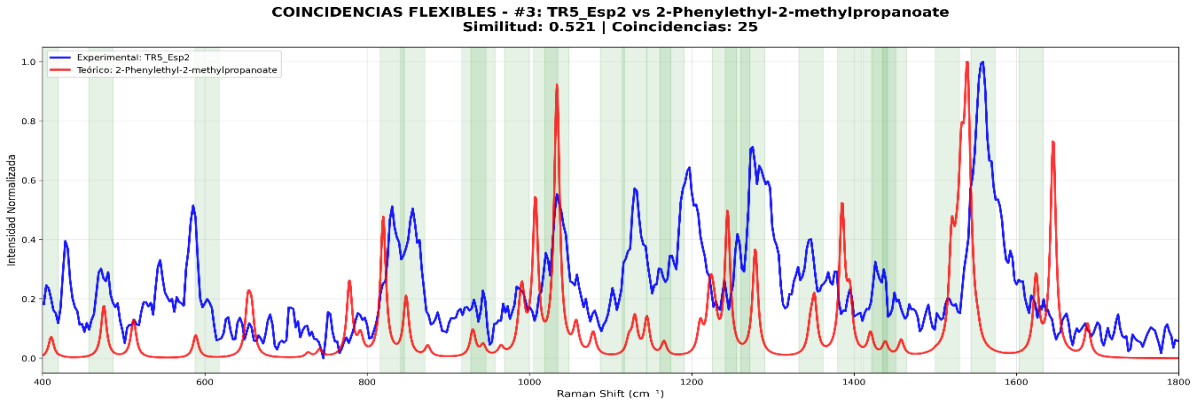


Figura 8. Correlación de 2-feniletil-2-metilpropanoato con tequila reposado (Autoría propia, 2026).

La correlación de espectros da un resultado de 2-feniletil-2-metilpropanoato para el tequila reposado, esto bajo un resultado global de similitud de 0.521 con 25 coincidencias.

- Tequila añejo.

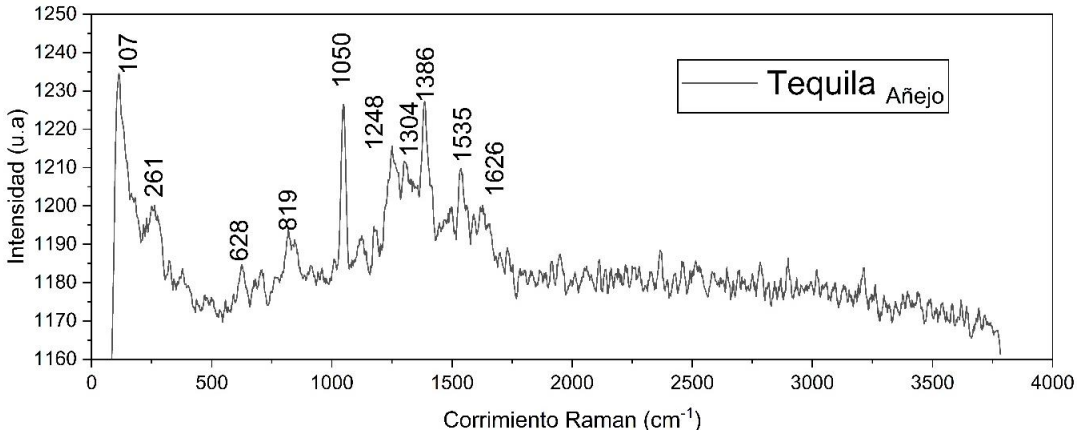


Figura 9. Espectro SERS de tequila añejo (Autoría propia, 2026).

El tequila añejo presenta vibraciones ν C=O, ν C=C, δ_s CH_3, COO^-, τ CH_2, δ C-H ip, ν_s C-O, ν C-O-C, δ C-H oop, δ C-C / C-S y vibración metal-molécula. Las vibraciones de grupos funcionales que se presentan, son: compuestos arómaticos, ésteres, fenoles, polifenoles, compuestos azufrados, terpenos, lactonas, éteres y ácidos carboxílicos.

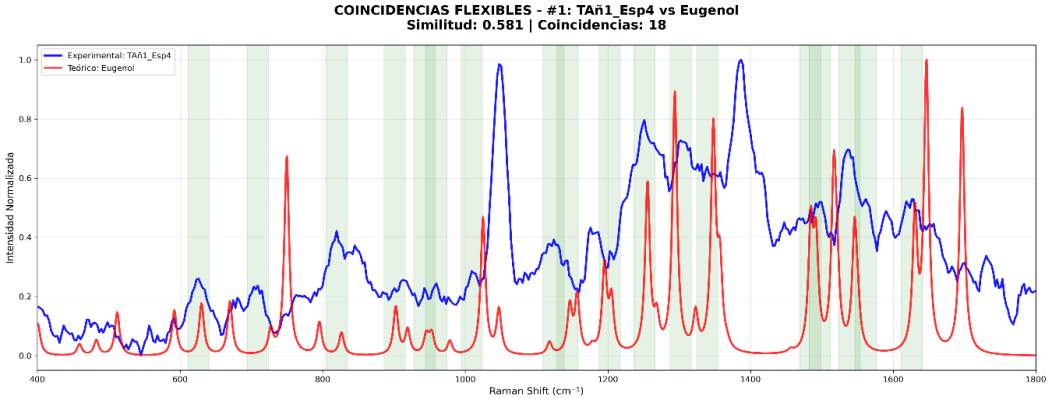


Figura 10. Correlación de Eugenol con tequila añejo (Autoría propia, 2026).

La relación de espectros experimental con teórico, dan un resultado global de 0.581 con 18 coincidencias de señales entre ellos. El mejor resultado que se asocia a esta correlación para el tequila añejo, es el eugenol.

- Tequila cristalino.

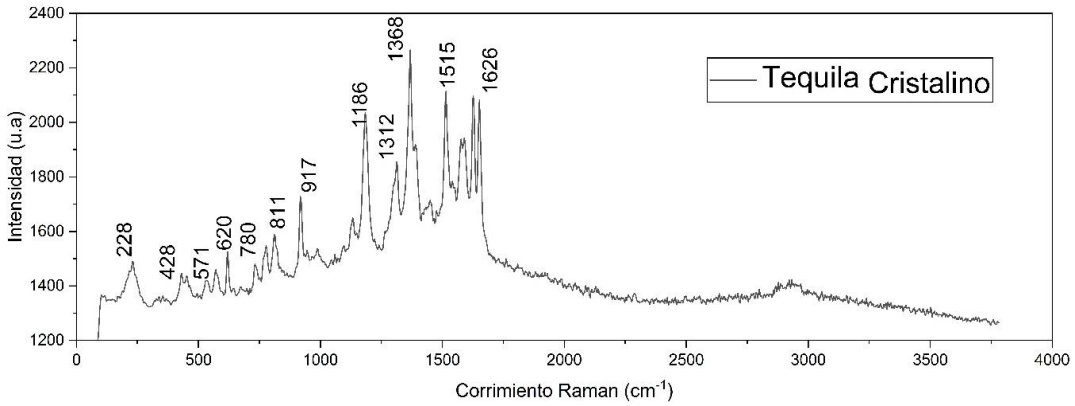


Figura 11. Espectro SERS de tequila cristalino (Autoría propia, 2026).

Las vibraciones moleculares del tequila cristalino son: ν C=O, ν C=C, δ_s CH_3, COO^-, τ CH_2 + δ C-H ip, ν C-O, δ C-H ip, ν C-C, δ C-O-C, ν C-O-C, δ C-H oop, δ C-C / C-S y vibración metal-molécula. Que se asocian a grupos funcionales: compuestos aromáticos, compuestos furánicos, ésteres, compuestos azufrados, lactonas, terpenos, ácidos, fenoles y aldehídos.

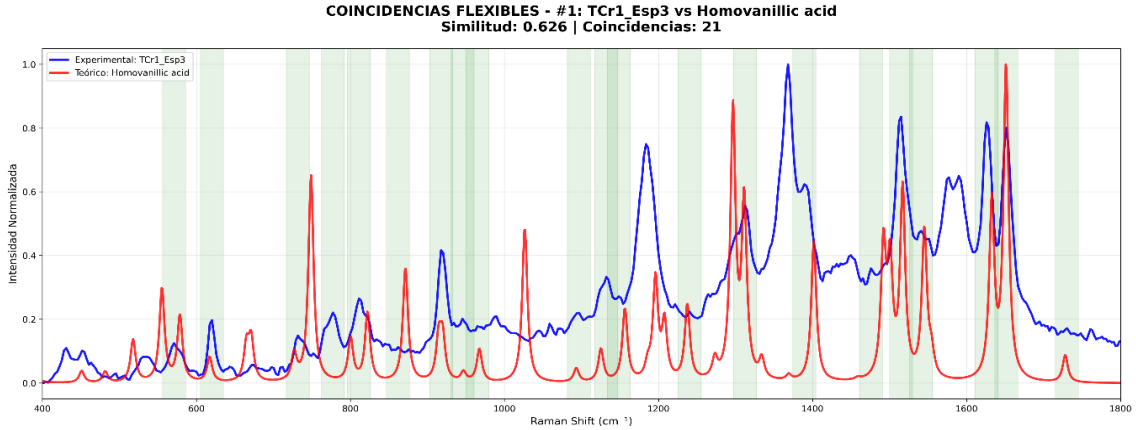


Figura 12. Correlación de ácido homovanílico con tequila cristalino (Autoría propia, 2026).

La correlación de espectros teórico con experimental, da un resultado global de 0.626 de similitud entre ellos con 21 coincidencias de señales. Bajo este resultado, el ácido homovanílico es la mejor relación que se obtiene para el tequila cristalino

Tabla 1. Asignación de vibraciones moleculares en espectros SERS de los tequilas.

Vibraciones	Vibraciones moleculares (cm^{-1})			
	Blanco	**Reposado**	**Añejo**	**Cristalino**
ν C=O	1623	--------	1626	1626
ν C=C	1595 y 1541	1559	1535	1515
δ_s CH_3 y COO^-	1370	1344	1386	1368
τ CH_2 + δ C-H ip	-------	--------	1304	1312
δ C-H ip y ν_{as} C-O	-------	1272	------	
ν C-O y δ C-H ip	1181	1197 y1132	------	1186
ν_s C-O	------	1033	1050	
ν C-C + δ C-O-C	------	917	------	917

v C-O-C y δ C-H oop	------	828	819	811
δ C-H oop	774	------	------	780
δ C-C / C-S	617	585	628	620 y 571
v Metal-molécula	437, 351 y 240	469, 428 y 129	261 y 107	428 y 228

En los espectros SERS, se observan las vibraciones moleculares simétricas y asimétricas, deformaciones simétricas dentro y fuera del plano del grupo C-H (CH_3 y CH_2), C-C y C-S. También confirman la presencia de aldehídos, cetonas, aromáticos y ácidos, sin dejar a un lado la vibración metal-molécula, en el que confirma que en los tequilas hay presencia de enlaces nanopartículas metálica con las moléculas orgánicas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró que las clases de tequilas estudiadas tienen la capacidad para generar nanopartículas de plata mediante una reacción de oxido-reducción, bajo condiciones de exposición de energía externa. Así mismo, las nanopartículas de plata cumplen una función primordial para llevar a cabo la técnica SERS, los espectros obtenidos presentan señales con una mayor intensidad y definición, logrando minimizar la señal de fluorescencia casi en su totalidad como se muestra en la espectroscopía Raman. La asignación de vibraciones moleculares se asocia a: v C=C, δ CH_3, δ COO^-, v C-O, δ C-H ip, δ C-H oop, δ C-C y C-S y v metal-molécula, se pueden atribuir a cierto grupo de moléculas como: ácidos, aromáticos, sulfuros y ésteres.

La espectroscopía UV-Vis, resultaron ser dos técnicas que proporcionan información de igual importancia. La espectroscopía UV-Vis, nos permite confirmar la presencia de las nanopartículas generadas *in situ* en cada uno de los tequilas. Las señales plasmónicas coinciden con la región del espectro con un máximo de absorción alrededor de los 423 nm tal como se reporta para los coloides de plata.

En cuanto a Python, se obtienen espectros correlacionados a cierto grupo o grupos de moléculas que nos aproximan a las mismas que están adsorbidas o cerca de la superficie metálica de las nanopartículas y que permitieron intensificar sus vibraciones moleculares y un resultado óptimo. Los resultados preliminares que exhibe este trabajo, los grupos funcionales detectados son: éster y ácido.

Cabe mencionar que aún el código de Python empleado requiere mejoría de análisis y que este sea más específico para mejorar el grado de similitud entre espectros, así como una mejor asociación de señales

AGRADECIMIENTOS: Al Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica (LUCE) del ICAT-UNAM por las facilidades de uso de equipos espectroscópicos. Al programa **PAPIIT IN110224** por el apoyo económico durante la realización de dicho trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Diario Oficial de la Federación M (2012) NOM-006-SCFI-2012. Norma Oficial Mexicana: Bebidas alcohólicas-Tequila-especificaciones. Mexico.
[2] Consejo Regulador del Tequila (2026) https ://www.crt.org.mx. Acceso: 09 Feb 2026.
[3] Consejo Regulador del Tequila, (2015), Nuestro Tequila, Autenticidad y calidad certificada. https://www.crt.org.mx/nuestro-tequila/
[4]Cámara Nacional de la Industria Tequilera (CNIT), (2020). EL TEQUILA - CNIT. https://www.cnit.org.mx/el-tequila/
[5] Ceballos-Magaña, S. G., De Pablos, F., Jurado, J. M., Martín, M. J., Alcázar, Á., Muñiz-Valencia, R., Gonzalo-Lumbreras, R., & Izquierdo-Hornillos, R. (2012). Characterisation of tequila

according to their major volatile composition using multilayer perceptron neural networks. *Food Chemistry*, *136*(3-4), 1309-1315. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.048J.

[6] Muñoz-Muñoz AC, Grenier AC, Gutierrez-Pulido H, Cervantes-Martínez J (2008) Development and validation of a High Performance Liquid Chromatography-Diode Array Detection method for the determination of aging markers in tequila. J Chromatogr A 1213:218–223. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.10.018

[7] Benn SM, Peppard TL (1996) Characterization of tequila flavor by instrumental and sensory analysis. J Agric Food Chem 44:557–566. https://doi.org/10.1021/jf9504172

[8] Contreras U, Barbosa-García O, Pichardo-Molina JL, et al (2010) Screening method for identification of adulterate and fake tequilas by using UV-VIS spectroscopy and chemometrics. Food Res Int 43:2356–2362. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.001

[9] Vázquez JMD, Fabila-Bustos DA, Quintanar-Hernández LFD, et al (2015) Detection of Counterfeit Tequila by Fluorescence Spectroscopy. J Spectrosc 2015:1–7. https://doi.org/10.1155/2015/403160

[10] Lachenmeier DW, Richling E, López MG, et al (2005) Multivariate analysis of FTIR and ion chromatographic data for the quality control of tequila. J Agric Food Chem 53:2151–2157. https://doi.org/10.1021/jf048637f

[11] Carreon-Álvarez A, Casillas N, Ibanez JG, et al (2008) Determination of Cu in tequila by anodic stripping voltammetry. Anal Lett 41:469–477. https://doi.org/10.1080/00032710701577989

[12] Espinosa-Vega LI, Belio-Manzano A, Mercado-Ornelas CA, et al (2019) Aging spectral markers of tequila observed by Raman spectroscopy. Eur Food Res Technol 245:. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3203-4

[13] Frausto-Reyes C, Medina-Gutierrez C, Sato-Berru R, Sahagun LR (2005) Qualitative study of ethanol content in tequilas by Raman spectroscopy and principal component analysis. Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc 61:2657–2662. https://doi.org/10.1016/j.saa.2004.10.008

[14] Prado-Jaramillo N, Estarrón-Espinosa M, Escalona-Buendía H, et al (2015) Volatile compounds generation during different stages of the Tequila production process. A preliminary study. LWT - Food Sci Technol 61:471–483. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.042

[15] Martín-Del-Campo, S., López-Ramírez, J., & Estarrón-Espinosa, M. (2019). Evolution of volatile compounds during the maturation process of silver tequila in new French oak barrels. *LWT*, *115*, 108386. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108386

[16] Singh, D., Pradhan, M., & Materny, A. (2021). Modern Techniques of Spectroscopy.En Progress in optical science and photonics. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6084-6

[17] Tehrani, A.M., Mohaghegh, F., Materny, A. (2024). Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS). In: Singh, D.K., Kumar Mishra, A., Materny, A. (eds) Raman Spectroscopy. Springer Series in Optical Sciences, vol 248. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1703-3_8

[18] Buriticá, O. I. T., & Guerrero, L. E. M. (2021). *Introducción a la programación con Python*.

W. J. Hehre, W. A. Lathan, R. Ditchfield, M. D. Newton, and J. A. Pople, Gaussian 70 (Quantum Chemistry Program Exchange, Program No. 237, 1970)

[19] Sato-Berrú, R. Y., Mejía-Uriarte, E. V., Vázquez-Olmos, A. R., & Paraguay-Delgado, F. (2022). Colorimetric research of silver colloids. *Journal of Cluster Science*, *33*(5), 1969-1975.

[20] Ríos-Hernández, P. A., Gómez-Navarro, C. S., Warren-Vega, W. M., Gutiérrez, L. V. G., Zárate-Guzmán, A. I., & Romero-Cano, L. A. (2022). Comprehension of the adsorption mechanism in the selective color removal of extra-aged Tequila to produce Cristalino Tequila using tailored carbon materials. *Food Chemistry Advances*, *2*, 100174. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100174

[21] Warren-Vega, W. M., Fonseca-Aguiñaga, R., González-Gutiérrez, L. V., Carrasco-Marín, F., Zárate-Guzmán, A. I., & Romero-Cano, L. A. (2021). Chemical characterization of tequila maturation process and their connection with the physicochemical properties of the cask. *Journal Of Food Composition And Analysis*, *98*, 103804. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103804

[22] Yu R, Lin Q, Leung SF, Fan Z , 2012. Nanomaterials and nanostructures for efficient light absorption and photovoltaics. Nano Energy 1, 57–72

CUANTIFICACIÓN ÓPTICA DE MICROPLÁSTICOS MEDIANTE UMBRALES TÉRMICOS INDUCIDOS POR LÁSER PULSADO

Jesús Barrientos Ángeles, Lizeth Martínez-Ayala, Hilario Martines Arano, Jhovani Enrique Bornacelli Camargo

Escuela Superior Tepeji del Río, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
jhovani_bornacelli@uaeh.edu.mx, jhbornacelli@gmail.com

RESUMEN

La cuantificación de microplásticos y nanoplásticos en muestras ambientales continúa siendo un reto actual debido a las limitaciones típicas de la microscopía como técnica de medición local y las limitaciones en las técnicas de filtrado, lo cual dilata los tiempos e incertidumbre de estudio. En este trabajo, se propone un método óptico para la cuantificación de microplásticos que se basa en la ablación térmica controlada y el análisis teórico de la subsecuente atenuación óptica a través de la muestra de estudio. El método se basa en la relación entre la irradiancia del láser, coeficiente de absorción óptica del polímero, y las propiedades termo-físicas de los microplásticos.

El método consiste en el uso de un pulso láser de nanosegundos (régimen térmico) se induce selectivamente la fusión o ablación de las partículas microplásticas suspendidas en agua. La energía absorbida por pulso es modelada usando la relación de Lambert-Beer y la ecuación de difusión de calor, obteniendo una expresión analítica para los umbrales de ablación en función del tipo especifico de polímero, calor especifico, y temperatura de fusión. Por encima de este umbral, se modifica de forma controlada la cantidad de material microplásticos lo cual causa una atenuación óptica debido a procesos de absorción y dispersión óptica de la muestra. De manera que la concentración de microplásticos se infiere de cambios en la intensidad óptica transmitida antes y después de la irradiación a altas energías por pulso láser. Este modelo asume que la reducción acumulativa en la sección transversal de absorción óptica debido a la ablación térmica es proporcional al volumen total de material microplásticos que ha sido ablacionado, lo cual se puede relacionar una densidad numérica de partículas. Este análisis teórico sugiere que los polímeros con alto coeficiente de absorción óptica y bajas temperaturas de fusión tienen bajos niveles de umbral de ablación, lo cual proporcionaría una detección selectiva de microplásticos bajo condiciones particulares de irradiación láser.

Se propone una validación experimental a través de la medición de espectros de transmisión óptica lineal simultáneamente con la irradiación laser a altas irradiancias, su correlación con los cambios en la atenuación óptica y la interpretación a partir del modelo propuesto, ofreciendo un análisis rápido y global de la concentración de microplásticos en un volumen de agua dado.

INTRODUCCIÓN

Los microplásticos constituyen en la actualidad lo que se denomina un contaminante emergente y de gran dispersión a nivel mundial en medios acuosos como ríos, lagos, presas y mares, así como también en el aire, e incluso dentro de tejidos biológicos tanto animal como humano. Una de las grandes dificultades es precisamente separarlos e identificarlos del medio ambiente o tejidos biológicos. En primer lugar las muestras reales no solo contienen partículas plásticas si no también otro tipo de contaminantes como metales pesados, polvo, materia orgánica, etc. Por lo que primero de la muestra debe aislarse el tipo de contaminante polimérico de otro tipo de partículas. En segundo lugar, debe realizarse un conteo de las partículas plásticas mediante microscopia, y en tercer lugar estas partículas diminutas deben ser clasificadas en alguno de los distintos tipos de plásticos que existen, tales como PVC, PET, Nylon, PS, etc. Todo esto nos permite cuantificar el grado de contaminación y realizar inferencia acerca de su posible origen[1]. Esta metodología no solo consume largos tiempos de análisis si no también recursos y el empleo de diversas técnicas de análisis. En

este trabajo se propone implementar una metodología para la identificación de microplásticos que permitan reducir tiempos de análisis y a la vez nos permitan obtener una información más global de las muestras de estudio, y no tan local como los análisis por microscopía óptica. El método que se propone en este trabajo se basa en la fusión de los plásticos con la temperatura. Cada tipo de plásticos tiene una temperatura de fusión diferente, que puede alcanzarse también mediante irradiación láser de alta potencia. Los microplásticos también pueden ser ablacionados con el empleo de láseres y esto cambiaría la forma en que absorben o dispersan luz[2]. En este trabajo se desarrolla un cálculo numérico de cómo cambiaría la transmisión óptica de un sistema de partículas esféricas bajo irradiación láser de nanosegundos, que es un régimen de interacción totalmente térmico. Asimismo, se plantea un posible arreglo experimental para la medición de tipo de plásticos y concentración de microplásticos en una muestra dada.

TEORÍA

Se considera una suspensión acuosa que contiene microplásticos esféricos de algún tipo (PET, PVC, Nylon, PS, etc). Esta suspensión se irradia con pulsos láser de nanosegundos. Se asume asimismo que las partículas se encuentran distribuidas aleatoriamente, y que su concentración es lo suficientemente baja para despreciar efectos de dispersión múltiple. Debido a que el sistema es irradiado con un láser de nanosegundos se asume que la interacción luz-materia ocurre en un régimen térmico. En primer lugar, consideramos la atenuación óptica inicial considerando la ecuación de Lambert-Beer. La intensidad de la luz transmitida se describe mediante la ecuación[3]:

$$\boldsymbol{T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha L}} \tag{1}$$

Donde L es la longitud óptica del sistema, y $\boldsymbol{\alpha}$ es su coeficiente de absorción óptica lineal. Para una mezcla de microplásticos[3]:

$$\boldsymbol{\alpha = \sum N_i \sigma_i} \tag{2}$$

Donde $\boldsymbol{N_i}$ es la densidad numérica del polímero $\boldsymbol{i}$, y $\boldsymbol{\sigma_i}$ es su sección eficaz de extinción. Por tanto de aquí, obtenemos que[3]:

$$\boldsymbol{T_0 = e^{-\sum N_i \sigma_i L}} \tag{3}$$

Representa la transmitancia inicial del sistema antes de la irradiación con láser pulsado de nanosegundo.

Por otro lado, podemos considerar que la extensión óptica se aproxima mediante[3]

$$\boldsymbol{\sigma_i \approx Q_{ext,i}\, \pi r_i^2} \tag{4}$$

Donde $\boldsymbol{r_i}$ es el radio de la partícula plástica $\boldsymbol{i}$ y $\boldsymbol{Q_{ext,i}}$ es su eficiencia de extensión. Para partículas plásticas cuyo tamaño sea tal que $\boldsymbol{r \gg \lambda}$, como sería el caso de microplásticos de decenas de micrómetros irradiados con luz laser de 532 nm, podemos tomar $\boldsymbol{Q_{ext,i} \sim 1}$. Esta aproximación introduce explícitamente la dependencia con el tamaño de partícula.

Una vez que el láser interactúa con las partículas plásticas en suspensión estas absorben energía de la radiación laser incidente y se genera un incremento local de temperatura. La evolución térmica se describe mediante la ecuación:

$$\boldsymbol{\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + S(r,t)} \tag{5}$$

Donde $\boldsymbol{\rho}$ es la densidad, $\boldsymbol{c_p}$ el calor específico, $\boldsymbol{k}$ es la conductividad térmica y $\boldsymbol{S}$ es la fuente térmica producida por el láser. Para pulsos de nanosegundos se adopta una primera aproximación energética:

$$\boldsymbol{E_{abs} = A_{abs} I_F \pi r^2} \tag{6}$$

Donde $\boldsymbol{A_{abs}}$ es la fracción de energía absorbida del láser y $\boldsymbol{I_F}$ la fluencia del láser. Esta energía absorbida produce un incremento de temperatura dado por

$$\boldsymbol{E_{abs} = m c_p \Delta T} \tag{7}$$

De aquí podemos obtener que:

$$\boldsymbol{\Delta T(I_F) = \frac{3 A_{abs} I_F}{4 \rho c_p r}} \tag{8}$$

La modificación térmica de las partículas plásticas comienza cuando:

$$\boldsymbol{T_a + \Delta T = T_f} \tag{9}$$

Donde $\boldsymbol{T_a}$ es la temperatura ambiente, la temperatura de las partículas antes de la irradiación láser, y $\boldsymbol{T_f}$ es la temperatura de fusión del polímero que conforma la partícula. Por tanto, la fluencia láser umbral para ablacionar una partícula polimérica está dada por:

$$\boldsymbol{I_{Fu} = \frac{4 \rho c_p r (T_f - T_a)}{3 A_{abs}}} \tag{10}$$

Ahora definimos una fracción de modificación térmica dada por:

$$\boldsymbol{\eta_i(I_F) = 1 - e^{-\beta_i (I_F - I_{Fu})}} \tag{11}$$

Donde $\boldsymbol{\beta_i}$ es un coeficiente de modificación termo-óptica. Aquí nótese que $\boldsymbol{\eta_i}$ es 1 cuando se ha modificado térmicamente a la partícula polimérica, y 0 cuando no hay modificación térmica inducida. Esta modificación térmica induce cambios en la sección transversal de absorción de la partícula, reduciendo su capacidad de absorción y dispersión de luz:

$$\boldsymbol{\sigma_i(I_F) = \sigma_i(1 - \eta_i(I_F))} \tag{12}$$

Estas ecuaciones asumen que a altas irradiancia $\boldsymbol{\eta_i = 1}$, lo cual significa que toda la absorción o dispersión asociada a la partícula polimérica desaparece.
Teniendo en cuenta estas consideraciones los cambios en la transmitancia en función de la fluencia láser están descritos por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{T(I_F) = T_0 e^{\left[N_i \sigma_i L \left(1 - e^{-\beta_i (I_F - I_{Fu})}\right)\right]}} \tag{13}$$

RESULTADOS

Para cada tipo de polímero hay una temperatura de fusión diferente, por lo que los umbrales de ablación térmica inducidos por el láser deben ser diferentes para cada tipo de microplásticos. En la Tabla 1 se listan las temperaturas de fusión típica de tres polímeros y los umbrales de ablación

inducidos por un láser de nanosegundos considerando un ancho temporal de los pulsos de 7 ns, y un spot láser de 0.2 mm.

Tabla 1. Temperaturas de fusión y fluencias de ablación térmicas calculadas para un láser de nanosegundos

Plástico	Temperatura de fusión, °C	Fluencias de ablación térmica, μJ
PVC	105	63
Nylon	220	160
PET	260	280

Considerando un sistema conformado de únicamente partículas plásticas esféricas de 10 μm de diámetro de PVC, se calculó cómo varia la transmitancia con la ecuación (13) en función de la fluencia láser. Para esto se consideró un valor de L de 1 cm, típico de cubetas ópticas, y se calculó la sección transversal con la ecuación (4). Se usan distintos valores de concentración de partículas Ni para observar posibles cambios en la respuesta de la transmitancia en función de la concentración de microplásticos. Los coeficientes β_i se utilizaron como parámetros efectivos en de modificación termo-óptica. Estos coeficientes determinan la rapidez con la que disminuye la sección transversal de extinción una vez superado el umbral térmico. En las simulaciones se emplearon valores representativos de 8, 4 y 2 cm^2/J para PVC, Nylon y PET, respectivamente, con el propósito de ilustrar distintos regímenes de respuesta térmica. En una formulación más rigurosa β_i puede relacionarse con la absorción óptica, el calor especifico, la densidad y tamaño de las partículas plásticas.

En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados numéricos relacionados con los cambios de la transmitancia óptica de un sistema conformado por partículas plásticas de 10μm asumiendo distintas concentraciones.

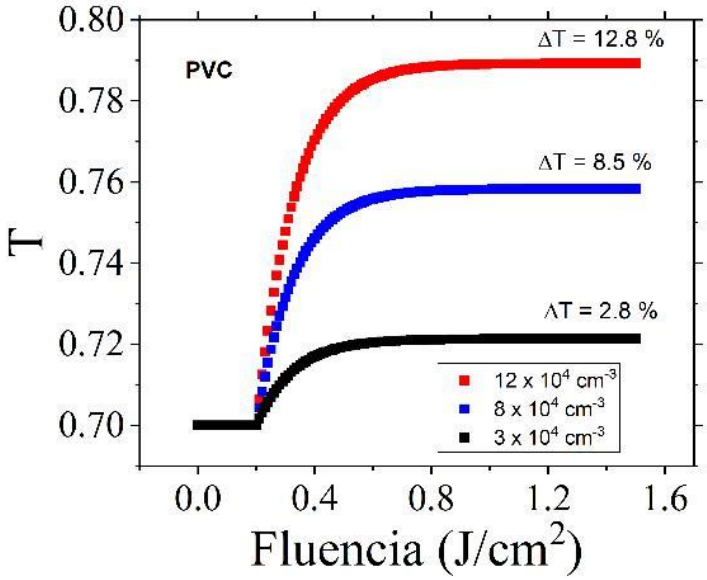


Figura 1. Transmitancia óptica en función de la fluencia de irradiación láser a través de un sistema conformado por partículas de PVC de 10 μm de diámetro.

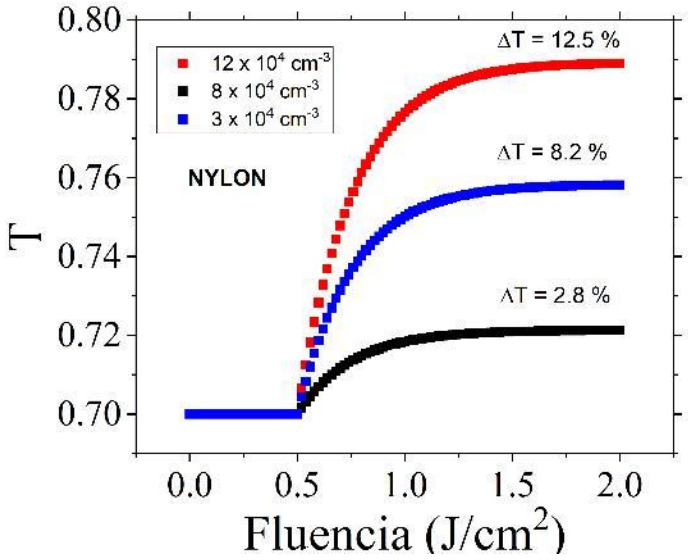


Figura 2. Transmitancia óptica en función de la fluencia de irradiación láser a través de un sistema conformado por partículas de Nylon de 10 μm de diámetro.

De los resultados numéricos en las figuras 1 y 2, puede notarse que en primer lugar la transmitancia empezará a aumentar después de que se alcancé el umbral de irradiación láser necesario para empezar a ablacionar los microplásticos. Después de esto, la transmitancia alcanzará un valor máximo que depende de la concentración de micropartículas en el sistema. Los cambios en la transmitancia están comprendidos entre el 3 y 12 por ciento de la transmitancia inicial, los cuales pueden ser detectables en un experimento de transmitancia típico.

En la figura 3 se propone un esquema del montaje experimental para realizar las mediciones de los cambios de transmitancia en función de la irradiación láser en un sistema conformado por microplásticos.

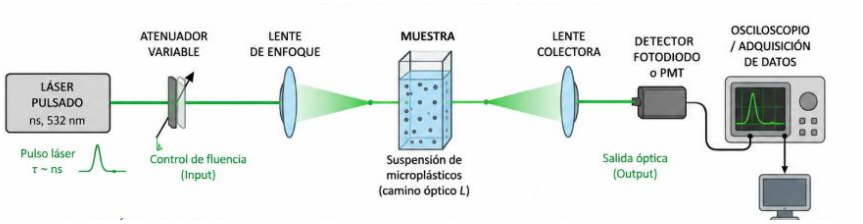


Figura 3. Esquema experimental propuesto para la medición de la transmisión óptica en función de la irradiación láser para determinar concentración y tipo de plásticos que conformen un sistema de microplásticos suspendidos en agua.

La configuración consiste en un experimento tipo *input-output* en el cual un pulso láser de nanosegundos es enfocado sobre el líquido que contiene los microplásticos en suspensión. El método input-output es un método típico para estudiar las propiedades ópticas no lineales de nanomateriales[4]. Mediante el control de la energía por pulsos del amplificador láser y el diámetro del spot dentro de la cubeta se controla la fluencia láser sobre el sistema. Al atravesar la muestra la luz láser es colectada de nuevo por una lente y dirigida a un sensor de energía o fotodiodo, el cual está a su vez conectado a un osciloscopio, para medir los cambios en la intensidad del haz.

En el experimento primero se debe medir los umbrales de fluencia láser, a partir de los cuales hay un cambio en la transmisión óptica de la muestra. Estos umbrales permitirán determinar el tipo de plásticos del cual están hechos los microplásticos en la muestra. Posteriormente, se debe incrementar la fluencia láser hasta alcanzar un máximo en la transmisión óptica de la muestra. Dependiendo del cambio máximo en la transmitancia podremos determinar la concentración numérica de partículas plásticas en el sistema usando la ecuación (13).

CONCLUSIONES

Se desarrollo un modelo teórico para describir los cambios en transmitancia óptica de un sistema de partículas plásticas usando la ley de Lambert-Beer con una sección transversal de absorción variable en función de umbrales de ablación térmica y un coeficiente termo-óptico cuyo valor cambia dependiendo del tipo de plástico que conforma las micropárticulas. Los resultados numéricos indican que la transmisión óptica de la muestra debe aumentar a fluencias por encima del umbral de ablación térmica de cada tipo de plástico. De acuerdo con el modelo desarrollado los cambios en la transmisión óptica están comprendidos entre el 3 y 12 porciento de la transmisión óptica inicial de las muestras a bajas irradiancias láser. El umbral de ablación térmica nos permite determinar el tipo de plástico que conforma a las partículas, mientras que los cambios porcentuales de la transmitancia a altas irradiancias nos permiten inferir la concentración de partículas en el sistema. Se propuso además un arreglo experimental óptico tipo input-output para validar el modelo propuesto y cómo un método rápido y novedoso para identificar microplásticos en muestras reales.

BIBLIOGRAFÍA

1. G. Renner, T. C. Schmidt and J. Schram, “Analytical methodologies for monitoring micro(nano)plastics: Which are fit for purpose?”, Curr. Opin. Environ. Sci. Health, Vol. 1, 2018, pp. 55-61.
2. D. Bäuerle, Laser Processing and Chemistry, 4th ed. (Springer, Berlin, Germany, 2011).
3. J. Solé, L. Bausa and D. Jaque, An Introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids (Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2005).
4. J. Bornacelli, C. Torres-Torres, A. Crespo-Sosa, J. A. Reyes-Esqueda and A. Oliver, “Plasmon-enhanced multi-photon excited photoluminescence of Au, Ag, and Pt nanoclusters”, Nanotechnology, Vol. 35, No. 17, 2024, 175705.

EVALUACIÓN ÓPTICA DE LA FOTODEGRADACIÓN EN MICROPLÁSTICOS

J. Javier Padilla H., Manuel H. De la Torre I., Claudio Frausto R., Brenda M. Guzmán V.

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Unidad Aguascalientes.
javierph@cio.mx.

RESUMEN

El plástico es el término general para los materiales sintéticos y semisintéticos, producidos a partir de derivados del petróleo, hidrocarburos, celulosa, entre otros. Estos materiales poseen alta durabilidad, versatilidad y bajo costo, por lo que son ampliamente empleados en todo tipo de industria, así como en actividades cotidianas. A pesar de la durabilidad del plástico, este se degrada en un proceso lento generado por diversos factores medioambientales, resultando en partículas menores de 5 milímetros denominadas microplásticos. Dentro de los principales factores que degradan un plástico se encuentra la exposición a la radiación ultravioleta (UV) como un efecto a los rayos del sol. Lo anterior da lugar a cambios en su morfología, composición química y posteriormente, su fragmentación. En este trabajo se presenta una metodología para detectar la fotodegradación en plásticos de uso cotidiano como el tereftalato de polietileno (PET). Para ello se usa una cámara de irradiación UV, en donde se colocan muestras de estos materiales en distintos intervalos de tiempo sometidas a UV. Técnicas ópticas como la espectroscopía Raman se usan para detectar cambios en la respuesta espectral del material, dando información sobre propiedades moleculares y químicas de los materiales bajo estudio. De los resultados obtenidos se logró visualizar el cambio provocado por la radiación del tipo UV-B sobre las muestras en distintos periodos de irradiación. En este estudio se evaluó el efecto de la radiación UV-B sobre la composición química de muestras de PET, lo cual forma parte de un proyecto más extenso para el estudio de microplásticos.

INTRODUCCIÓN

El tereftalato de polietileno es uno de los polímeros termoplásticos más usados a nivel mundial en la fabricación de envases para bebidas y alimentos, así como de fibras textiles y componentes industriales, debido a que combina propiedades mecánicas, químicas y ópticas que se traducen en alta resistencia, transparencia, estabilidad térmica y baja permeabilidad a gases. Estas características impulsan su uso masivo. Sin embargo, el crecimiento sostenido en la producción mundial de PET ha incrementado la acumulación de residuos plásticos en el ambiente, siendo una de las fuentes principales de contaminación por microplásticos. Diversos estudios reportan la presencia de microplásticos en cuerpos de agua, sedimentos, el aire e incluso en tejidos biológicos, lo que despierta preocupación por sus efectos ambientales negativos.

Una vez expuesto a condiciones ambientales, el PET sufre procesos de degradación debido a factores físicos, químicos y biológicos. Dentro de estos se encuentra la radiación ultravioleta (UV), la cual representa uno de los mecanismos más relevantes debido a su capacidad para iniciar reacciones fotoquímicas que generan la ruptura de los enlaces químicos, la formación de radicales libres, así como reacciones de fotoxidación. Estas reacciones producen cambios en el peso molecular, en los grupos carbonilo y carboxilo, así como modificaciones en la cristalinidad y deterioro progresivo en las propiedades mecánicas del plástico. Todos estos fenómenos favorecen la posterior degradación del PET, lo que contribuye a la generación de partículas de microplásticos.

La espectroscopia Raman permite identificar cambios en enlaces químicos específicos, variaciones en las cadenas poliméricas y modificaciones en el grado de orden molecular. En el caso del PET, las vibraciones asociadas al anillo aromático, a los grupos éster y a las unidades de etilenglicol producen bandas características cuya afectación puede relacionarse directamente con procesos de fotoxidación.

Esta técnica permite detectar modificaciones tempranas provocadas por la fotodegradación, incluso antes de la aparición de daños visibles en la superficie del material, como se muestra en este trabajo. Además, la espectroscopía Raman es de gran utilidad para la identificación de microplásticos de PET presentes en muestras ambientales y para evaluar su estado de degradación.

Por lo anterior, la evaluación óptica de la fotodegradación del PET mediante espectroscopía Raman constituye una estrategia de gran interés ambiental y científico. La información obtenida permite relacionar cambios espectrales con transformaciones químicas inducidas por radiación UV, lo que proporciona herramientas para el monitoreo de la degradación de materiales poliméricos y la evaluación de la generación de microplásticos derivados de PET en el ambiente.

TEORÍA

Generación de microplásticos por fotodegradación

La degradación de los plásticos es un proceso complejo, provocado por múltiples factores ambientales, entre ellos la radiación solar, el calor, la humedad, la actividad microbiana y los esfuerzos mecánicos [1,2]. Estos factores actúan en conjunto, provocando cambios en la estructura química de las cadenas poliméricas, como la ruptura de cadenas, el entrecruzamiento y la formación de nuevos grupos funcionales (carbonilos, hidroperóxidos, carboxilatos, vinilo), lo que conlleva una alteración de las propiedades físicas y mecánicas [3,4].

En el caso de los polímeros semicristalinos como el PET, la degradación afecta en mayor medida a las regiones amorfas, que son más accesibles a la difusión de oxígeno y agua. La ruptura de cadenas en estas regiones puede inducir un fenómeno de cristalización, en el que segmentos de cadenas poliméricas se reorganizan, formando nuevas regiones cristalinas y aumentando la cristalinidad general del plástico, lo que genera esfuerzos de tensión internos que promueven la fragilización y la formación de grietas [5]. Este proceso de fragmentación convierte los residuos plásticos macroscópicos en microplásticos, que son partículas de entre cinco milímetros y un micrón, y posteriormente en nanoplásticos, que son partículas de tamaño menor a un micrón [6, 7].

Mecanismos de la fotodegradación del PET

El PET es un poliéster aromático cuya estructura química se muestra en la Figura 1 y es susceptible de fotodegradación mediante mecanismos de fotoxidación.

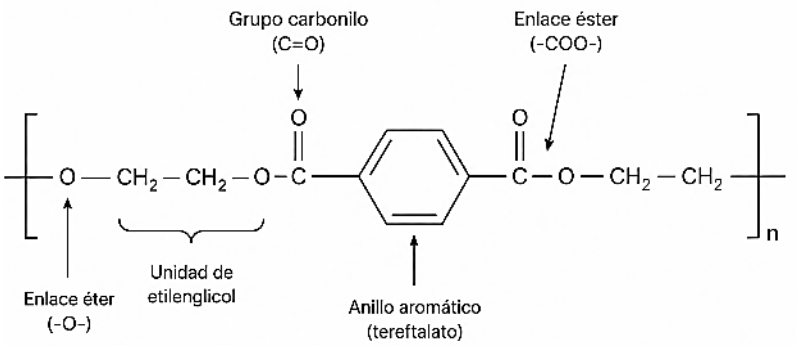


Figura 1. Estructura química del PET.

La absorción de la radiación UV, especialmente por debajo de los 315 nm, que corresponde a la radiación UVB y UVC, por parte de los grupos aromáticos y carbonilo presentes en la cadena principal, inicia reacciones de radicales libres [8].

La excitación del grupo carbonilo genera radicales libres que reaccionan con el oxígeno del ambiente para formar productos de oxidación como alcoholes, ácidos carboxílicos y ésteres de cadena corta [3]. De forma paralela, la hidrólisis de los enlaces tipo éster puede ocurrir en ambientes acuosos y se ve acelerada por temperaturas elevadas, así como por la presencia de ácidos o bases [9]. En la tabla 1 se presentan los principales procesos implicados en la fotodegradación del PET [10].

Tabla 1. Descripción de los indicadores de degradación en PET.

Proceso que analizar	Descripción
Disminución del peso molecular	Resultado de la ruptura de cadenas.
Formación de grupos carbonilo	Generación de nuevos grupos carbonilo detectables por espectroscopía.
Formación de grupos carboxilo y vinilo	Generación de grupos carboxilo y vinilo como productos finales de la fotoxidación.
Modificación de la cristalinidad	La cristalinidad disminuye, en un principio, debido a la ruptura de enlaces en zonas amorfas.
Aparición de productos de bajo peso molecular	Se producen monómeros y compuestos orgánicos solubles que contribuyen al carbono orgánico disuelto.

Espectroscopía Raman

La espectroscopia Raman es una técnica óptica no destructiva que se basa en la dispersión de luz monocromática por las moléculas analizadas. Cuando la luz monocromática (normalmente de una fuente láser) interactúa con la muestra, una pequeña fracción es dispersada con un cambio de energía, denominado “desplazamiento Raman”, que corresponde a las transiciones entre niveles vibracionales, rotacionales o electrónicos de las moléculas de la muestra [11]. La espectroscopia Raman es no destructiva, no requiere preparación de la muestra y es altamente sensible a los enlaces covalentes y a la estructura de la cadena principal del PET [12]. Para la molécula de PET, se han establecido regiones o bandas en el espectro Raman que permiten monitorear su degradación por fotoxidación; las principales bandas se presentan en la tabla 2 [13].

Tabla 2. Principales cambios en el espectro Raman durante la fotodegradación del PET.

Desplazamiento Raman (cm^{-1})	Grupo funcional	Cambio en el espectro
~1295	Estiramiento del grupo éster	La intensidad relativa y la anchura de la banda disminuyen debido a la ruptura de los enlaces carbono-oxígeno y carbono-carbono.
~1615	Vibraciones del anillo aromático	La intensidad relativa y la anchura de la banda disminuyen debido a la apertura del anillo o a la pérdida de grupos aromáticos.
~1725	Estiramiento del grupo carbonilo	La intensidad relativa y la anchura de la banda disminuyen debido al aumento de los nuevos productos de degradación.

Fragmentación del PET y fluctuación en su degradación

Se ha observado que la fotodegradación del PET no sigue un comportamiento lineal en las intensidades de las regiones del espectro Raman correspondientes a los grupos carbonilo, aromáticos y éster. Ya que estos indicadores siguen un patrón de fluctuación cíclico durante las

primeras etapas de degradación. Este comportamiento se atribuye a las capas superficiales del plástico, ya que la radiación UV debilita la capa externa del polímero, que se vuelve rígida y frágil. Posteriormente, esta capa superficial y degradada sufre estrés mecánico del ambiente, por ejemplo, debido a fenómenos de abrasión, agrietándose y desprendiéndose en forma de fragmentos de microplásticos. Dicho proceso de fragmentación elimina el material degradado y deja expuestas superficies no degradadas para iniciar un nuevo ciclo de degradación y fragmentación. Por ello, la espectroscopia Raman, debido a su sensibilidad en las primeras capas de la superficie, es una técnica adecuada para determinar qué tipo de plástico generará una mayor cantidad de microplásticos en ambientes reales [3].

PARTE EXPERIMENTAL

Para analizar las muestras de plástico PET, se obtuvieron botellas comerciales de PET y se generaron probetas que se colocaron en bastidores diseñados para recibir una irradiación UV homogénea (ver Figura 2), con el objetivo de simular las condiciones a las que se someten los materiales plásticos en la intemperie. Se empleó una cámara de irradiación UV con lámparas en el rango UVB (280-315 nm), en la que se mantuvieron las muestras durante diferentes tiempos de exposición a la radiación, de 0 a 96 horas continuas.

Se llevaron a cabo pruebas ópticas para detectar la fotodegradación en las muestras de PET mediante un espectrómetro Raman con una fuente láser de 632 nm, utilizando 3 estados de polarización: lineal, circular derecha e izquierda.

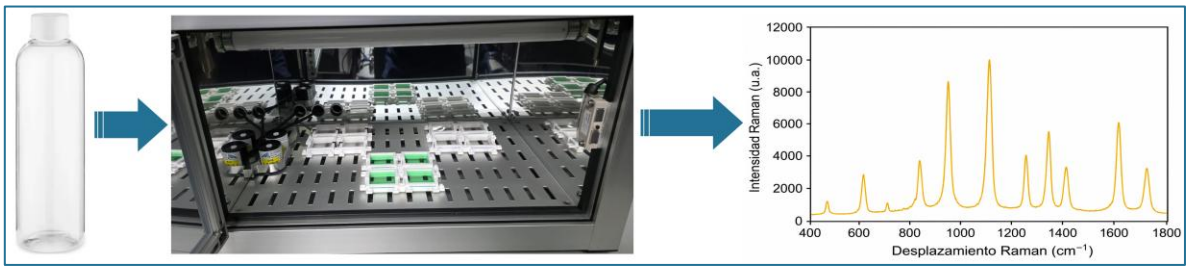


Figura 2. Metodología de evaluación de la fotodegradación

RESULTADOS

Tras 96 horas de irradiación continua en las muestras de PET, no se observaron cambios en sus propiedades macroscópicas ni superficiales. Sin embargo, los espectros Raman obtenidos de ellas muestran que sí existen cambios en su composición química aun en estos breves periodos de exposición. A continuación, se presentan los espectros obtenidos con polarización lineal debido a que es la señal que sirve de referencia en esta propuesta (ver Figura 3).

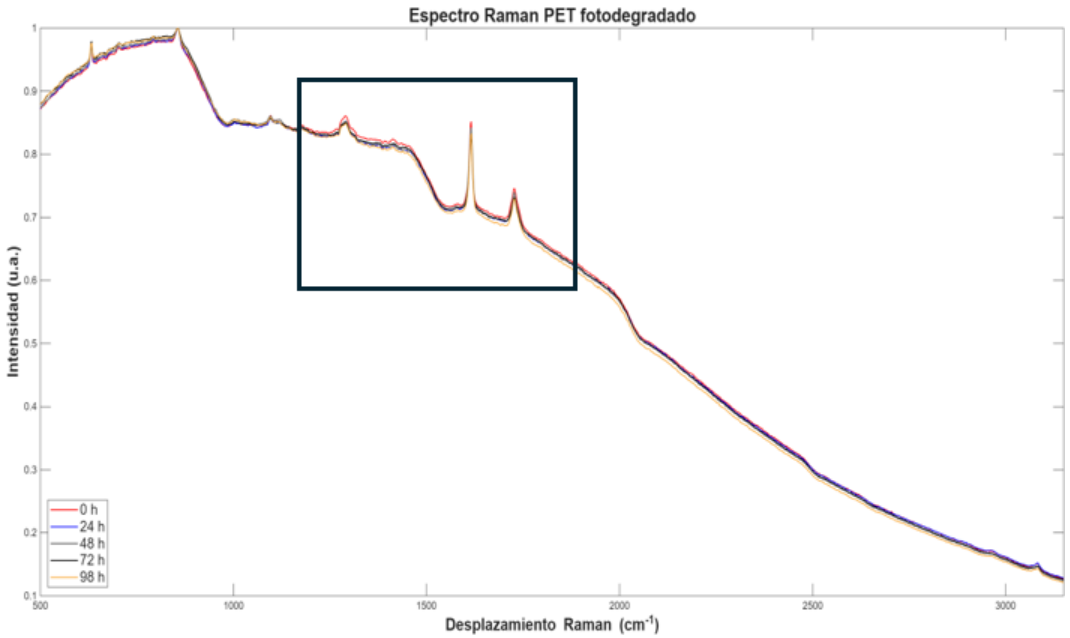


Figura 3. Espectro Raman de la muestra PET degradada a distintos tiempos, en negro se resalta la zona de interés.

De la Figura 4, la cual es un aumento de la zona de interés presente en la Figura 3, se observa una reducción en la intensidad y el ancho de los picos correspondientes al desplazamiento Raman en 1295, 1615 y 1725 cm^{-1}, debido a la degradación de los grupos funcionales éster, aromático y carboxilo, respectivamente.

El pico a 1295 cm^{-1} pierde intensidad por ruptura de la cadena principal del polímero, así como por el desorden estructural inducido por la radiación UVB, mientras que el pico de 1725 cm^{-1} disminuye por el cambio químico de grupos carbonilo hacia productos finales, por ejemplo, carboxilatos. Por último, región a 1615 cm^{-1} se atenúa por la acción directa de la radiación hacia el añillo aromático presente en el PET. Estos cambios en el espectro Raman del PET degradado indican un mayor desorden molecular lo que es resultado de la distribución variable de longitudes de cadena como consecuencia de la radiación [14]. Es así como con los resultados obtenidos es posible diferencias entre plásticos sin degradación y plásticos fotodegradados.

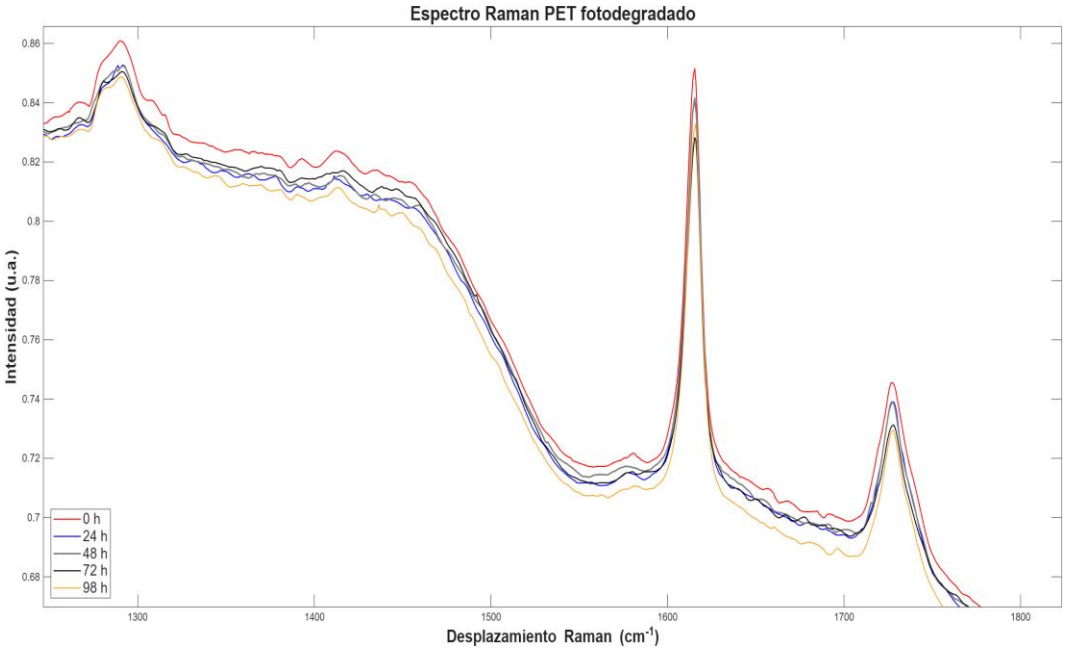


Figura 4. Ampliación del espectro Raman de PET degradado.

CONCLUSIONES

La espectroscopia Raman con polarización lineal permitió observar de manera temprana la fotodegradación de plásticos. Se plantea que este trabajo sirva de base para conocer el grado de afectación del plástico y su posterior fragmentación en microplásticos. De lo anterior, identificar este proceso de forma temprana permitirá determinar qué tipo de plástico generará la mayor cantidad de microplásticos en el ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. P. Pfohl, K. Santizo, J. Sipe, M. Wiesner, S. Harrison, C. Svendsen, and W. Wohlleben, "Environmental degradation and fragmentation of microplastics: dependence on polymer type, humidity, UV dose and temperature," Micropl.&Nanopl., vol. 5, art. no. 7, 2025, doi: 10.1186/s43591-025-00118-9.
2. K. Kamalasekaran and A. K. Sundramoorthy, "A review on microplastics: sources, environmental fate, degradation pathways, and analytical identification methods," RSC Adv., vol. 16, no. 15, pp. 13851–13874, Mar. 12, 2026, doi: 10.1039/d5ra09062h.
3. Y. Hiejima, T. Kida, K. Takeda, T. Igarashi, and K. Nitta, "Microscopic structural changes during photodegradation of low-density polyethylene detected by Raman spectroscopy," Polym. Degrad. Stab., vol. 150, pp. 67–72, 2018, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.02.010.
4. E. Yousif and R. Haddad, "Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review," SpringerPlus, vol. 2, art. no. 398, 2013, doi: 10.1186/2193-1801-2-398.
5. M. L. Di Lorenzo, "Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review," Polymers, vol. 16, no. 14, art. no. 1975, 2024, doi: 10.3390/polym16141975.
6. J. F. Rabek, Polymer Photodegradation: Mechanisms and Experimental Methods. London, UK: Chapman & Hall, 1995.
7. R. Anshari, M. Tsuboi, H. Sato, K. Tashiro, and Y. Ozaki, "Raman and ATR-FTIR unmask crystallinity changes and carboxylate group and vinyl group accumulation in natural weathering polypropylene microplastics," Sci. Rep., vol. 15, art. no. 2518, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-85837-y.

8. L. Liu, M. Xu, Y. Ye, and B. Zhang, "On the degradation of (micro)plastics: Degradation methods, influencing factors, environmental impacts," Sci. Total Environ., vol. 806, no. 3, art. no. 151312, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151312.
9. E. Smith and G. Dent, Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach. Chichester, UK: Wiley, 2005.
10. S. Ducoli, C. Marchesi, M. Rigo, A. Zacco, E. Caianiello, R. Castaldo, M. Cocca, S. Federici, and L. E. Depero, "Developing environmentally relevant test materials for microplastic research through UV-induced photoaging," J. Hazard. Mater. Adv., vol. 20, art. no. 100905, 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2025.100905.
11. Y. Umurhan, M. Songsart-Power, T. B. Limbu, et al., "Aplicaciones de la espectroscopía Raman para la detección y caracterización de microplásticos: una referencia espectral completa," Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 32, pp. 28630–28677, 2025, doi: 10.1007/s11356-025-37224-3.
12. A. Käppler, D. Fischer, S. Oberbeckmann, et al., "Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both?," Anal. Bioanal. Chem., vol. 408, pp. 8377–8391, 2016, doi: 10.1007/s00216-016-9956-3.
13. L. Mikac, A. Csáki, B. Zentai, I. Rigó, M. Veres, A. Tolić, M. Gotić, and M. Ivanda, "UV Irradiation of Polyethylene Terephthalate and Polypropylene and Detection of Formed Microplastic Particles Down to 1 µm," ChemPlusChem, vol. 89, no. 2, art. no. e202300497, 2023, doi: 10.1002/cplu.202300497.
14. Hyeonju Lee, Kangwon Lee, Heerang Chang and Dongha Shin. "Understanding Plastic Weathering Through Vibrational Spectroscopy" Elastomers and Composites 60, no.3 (2025) : 99-109.

ANÁLISIS NUMÉRICO DE SISTEMAS PERIÓDICOS QUE INCLUYEN MATERIALES SEMICONDUCTORES

J. C. Proa-Prado[1], A. Bucio-Gutiérrez[2], H. Pérez-Aguilar[2], H. E. Alva-Medrano[1]

[1] División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), Instituto Tecnológico de Morelia,
[2] Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Benemérita y Centenaria Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
hiperezag@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo de investigación se desarrolló un método numérico basado en el enfoque de ecuaciones integro-diferenciales para analizar una guía de ondas de cristal fonónico (PnCW) compuesta por inclusiones cilíndricas periódicas de silicio confinadas entre dos placas rígidas. El modelo matemático parte de la ecuación de Helmholtz para presión acústica armónica y emplea la segunda identidad de Green para expresar el campo acústico en términos de integrales evaluadas sobre las fronteras del dominio. Se imponen condiciones de pared rígida (condición de Neumann) en las placas superior e inferior, condiciones de periodicidad de Bloch–Floquet en los límites laterales de la celda unitaria, y condiciones de continuidad de la presión acústica y de la velocidad normal en la interfaz aire–silicio. Estas condiciones conducen a un sistema algebraico homogéneo cuya solución no trivial permite determinar los modos propios del sistema. A partir de dichos modos, se reconstruye la distribución espacial del campo de presión dentro de la celda unitaria, tanto en la región de la guía como en el interior de las inclusiones semiconductoras. El análisis en frecuencias reducidas evidencia una redistribución dependiente de la frecuencia: a bajas frecuencias el campo es más uniforme, mientras que en frecuencias medias y altas aumenta la localización alrededor de las inclusiones y la complejidad modal. Bajo ciertas condiciones, se observan patrones desordenados en la intensidad del campo, lo que sugiere un comportamiento caótico análogo al del sistema clásico correspondiente. Los resultados aportan fundamentos para el diseño y optimización de dispositivos acústicos basados en materiales semiconductores, con potencial aplicación en control de ondas, detección de defectos y encriptación de información.

INTRODUCCIÓN

El control de la propagación de ondas en medios periódicos constituye uno de los problemas centrales de la física ondulatoria moderna, debido a su relevancia en el diseño de dispositivos capaces de guiar, filtrar, confinar o redistribuir energía acústica y elástica. Dentro de este contexto, los cristales fonónicos han adquirido especial importancia porque permiten modificar la propagación de ondas mediante contrastes periódicos de densidad, módulo de compresibilidad, elasticidad o impedancia acústica. Dichos contrastes pueden originar estructuras de bandas y regiones prohibidas de propagación, conocidas como band gaps, en las cuales determinadas frecuencias no pueden transmitirse a través del sistema. Esta propiedad ha impulsado el desarrollo de aplicaciones relacionadas con aislamiento acústico, guías de onda, filtros selectivos, sensores, dispositivos de control de vibraciones y plataformas de manipulación de energía mecánica a micro y nanoescala [1–3].

La analogía entre cristales fonónicos y cristales electrónicos resulta particularmente útil para interpretar el comportamiento espectral de estos sistemas. Así como un potencial periódico en un sólido modifica el movimiento de los electrones y da lugar a bandas de energía, una distribución periódica de materiales con propiedades acústicas contrastantes altera la propagación de ondas sonoras o elásticas. En este sentido, los cristales fonónicos pueden entenderse como medios artificiales en los que la geometría, la periodicidad y el contraste material determinan la respuesta modal. Sin embargo, a diferencia de los sólidos cristalinos convencionales, en los cristales fonónicos

el diseño geométrico puede modificarse de manera deliberada, lo que permite ajustar las bandas permitidas y prohibidas de acuerdo con una frecuencia de operación específica [4].

Entre las configuraciones de mayor interés se encuentran las guías de onda de cristal fonónico, en las que la propagación queda confinada dentro de una región determinada mediante fronteras rígidas, defectos o arreglos periódicos de inclusiones. Estas guías permiten estudiar modos guiados discretos, confinamiento espacial de energía y fenómenos de dispersión asociados con la periodicidad. En particular, una guía formada por dos placas rígidas paralelas que contienen un arreglo periódico de inclusiones cilíndricas representa un modelo adecuado para analizar cómo la interacción entre fronteras, periodicidad e impedancia acústica modifica la estructura modal del sistema. La incorporación de inclusiones semiconductoras, como el silicio, introduce un contraste material significativo que puede influir en la localización del campo y en la distribución espacial de la intensidad acústica.

El silicio es un material de especial interés no sólo por su uso extendido en tecnologías microelectrónicas y microelectromecánicas, sino también porque sus propiedades mecánicas y acústicas permiten considerarlo en el diseño de dispositivos fonónicos integrados. En un tratamiento escalar equivalente, la inclusión de silicio puede modelarse mediante parámetros acústicos efectivos, tales como densidad, velocidad de propagación e impedancia. Aunque este enfoque no reproduce por completo la naturaleza elastodinámica del sólido, en particular los efectos asociados con ondas de corte, conversión modal o anisotropía, proporciona una primera aproximación útil para estudiar cómo una inclusión semiconductora modifica los modos acústicos guiados y su confinamiento espacial.

Desde el punto de vista computacional, el análisis de estos sistemas requiere métodos numéricos capaces de resolver problemas de frontera en geometrías periódicas. Los métodos volumétricos, como el método de elementos finitos, resultan ampliamente utilizados; no obstante, pueden incrementar de manera considerable el número de grados de libertad cuando se requieren barridos espectrales o reconstrucciones detalladas del campo. Como alternativa, los métodos integrales de frontera ofrecen una formulación eficiente porque reducen el problema al contorno del dominio. Al emplear funciones de Green apropiadas para la ecuación de Helmholtz, el campo dentro de cada región homogénea puede expresarse mediante integrales sobre las interfaces, evitando así mallar todo el volumen de la celda unitaria [5–7].

En una guía de onda periódica, la formulación integral debe complementarse con condiciones físicas consistentes. Las placas rígidas se describen mediante una condición de Neumann, equivalente a velocidad normal nula en la frontera. La periodicidad del sistema se introduce a través de condiciones de Bloch-Floquet, las cuales relacionan los campos en los bordes laterales de la celda unitaria mediante un factor de fase dependiente del vector de Bloch. Finalmente, en la interfaz entre el medio anfitrión y la inclusión semiconductora se imponen condiciones de continuidad de presión acústica y de velocidad normal de partícula, garantizando así una descripción adecuada de la transmisión y reflexión debidas al contraste de impedancia [8,9].

Después de la discretización del contorno, el problema se transforma en un sistema algebraico homogéneo cuya condición de existencia de soluciones no triviales permite identificar frecuencias propias, modos guiados y características de dispersión. Este enfoque resulta especialmente adecuado para estudiar la evolución del campo acústico en diferentes intervalos de frecuencia, ya que permite localizar mínimos asociados con modos discretos y reconstruir los patrones espaciales de intensidad dentro de la celda. La comparación entre regímenes de baja, media y alta frecuencia permite observar cómo la energía acústica pasa de distribuciones relativamente suaves y extendidas a configuraciones más complejas, con nodos, lóbulos, cambios de simetría y localización alrededor de la inclusión.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se orienta al análisis teórico-numérico de una guía de onda de cristal fonónico formada por dos placas rígidas paralelas y un arreglo periódico de inclusiones cilíndricas de silicio. La finalidad principal es evaluar cómo la presencia de un material semiconductor modifica los modos acústicos guiados, la distribución espacial de la intensidad y los mecanismos de confinamiento dentro de la celda unitaria. El estudio busca contribuir al diseño de estructuras fonónicas compactas basadas en materiales semiconductores, con posible aplicación en filtrado acústico, control modal, confinamiento de energía y desarrollo de dispositivos integrados para manipulación de ondas mecánicas.

METODOLOGÍA

El sistema analizado corresponde a una guía fonónica bidimensional constituida por dos placas rígidas paralelas que confinan un medio huésped, considerado aire, e incorporan un arreglo periódico de inclusiones cilíndricas de silicio. Debido a que el cilindro se supone infinito en la dirección axial, el problema se reduce a una sección transversal bidimensional y se modela mediante una celda unitaria representativa de la periodicidad del sistema. La Figura 1 muestra el esquema general de la configuración.

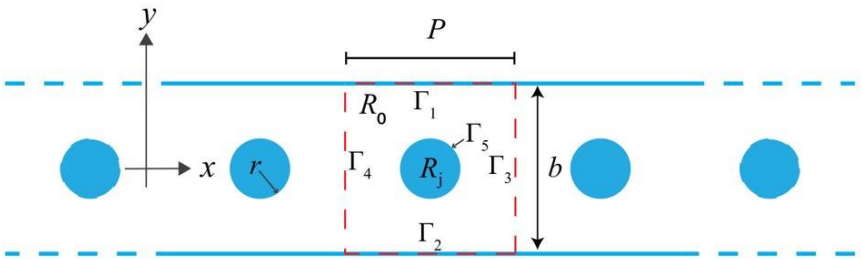


Figura 1. Guía de onda de cristal fonónico formada por dos placas paralelas que encierran un arreglo periódico de inclusiones cilíndricas.

La periodicidad se considera en la dirección horizontal con periodo P, mientras que la altura de la guía, equivalente a la separación entre placas, se denota por b. La inclusión circular de radio r se ubica dentro de la celda unitaria en una configuración centrada. La fracción de llenado se define como la razón entre el área del cilindro y el área de la celda rectangular, por lo que se obtiene

$$f = \frac{\pi r^2}{Pb} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{fPb}{\pi}}, \tag{1}$$

donde r es el radio del cilindro.

Para el caso con inclusión semiconductora, se utiliza silicio como material de referencia. Bajo las hipótesis de acústica lineal y dependencia temporal armónica, el campo de presión acústica en cada medio homogéneo satisface la ecuación de Helmholtz

$$(\nabla^2 + k_m^2) p_m(\mathbf{r}) = 0, \tag{2}$$

donde el subíndice m identifica el medio (1: aire, 2: silicio) y k_m es el número de onda, dado por

$$k_m = \frac{\omega}{c_m}. \tag{3}$$

Aquí, ω es la frecuencia angular y c_m es la velocidad del sonido en el medio m-ésimo. Para expresar el barrido espectral en forma adimensional y relacionarlo con la periodicidad del sistema, se introduce la frecuencia reducida

$$\omega_r = k_1 a = \frac{\omega a}{c_1} = \frac{2\pi f a}{c_1}. \tag{4}$$

En adelante, los resultados se reportan en términos de ω_r, donde c_1 corresponde a la velocidad del sonido en aire. En la implementación numérica se emplean parámetros consistentes con densidad e impedancia acústica para calcular los números de onda en cada región. Específicamente, se utilizan los valores $\rho_1 = 1.293\,\mathrm{kg/m^3}$ y $Z_1 = 427\,\mathrm{Rayls}$ para el aire, y $\rho_2 = 2329\,\mathrm{kg/m^3}$ y $Z_2 = 1.97 \times 10^7\,\mathrm{Rayls}$ para el silicio [10].

Es importante señalar que, aunque el modelo acústico de la región de inclusión de silicio, descrito mediante la ecuación escalar de Helmholtz y los parámetros ρ y Z, captura el contraste de impedancia dentro de un marco escalar y permite evaluar su influencia sobre la localización del campo, no incorpora efectos elastodinámicos propios de los sólidos, como modos de corte, conversión modal o anisotropía. Por lo tanto, su validez se limita a un tratamiento escalar equivalente, lo cual constituye una restricción del presente estudio.

Para transformar el problema diferencial en uno integral, se introduce la función de Green acústica asociada con cada región, la cual satisface la ecuación de Helmholtz con una fuente puntual. En dos dimensiones se utiliza la solución estándar

$$G_m(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_m|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|), \tag{5}$$

donde $H_0^{(1)}$ es la función de Hankel de primera clase y orden cero [11]. Al aplicar la segunda identidad de Green entre p_m y G_m sobre una región limitada por un contorno cerrado Γ, se obtiene la representación integral del campo

$$\alpha(\mathbf{r}_0) p_m(\mathbf{r}_0) = \int_\Gamma \left[G_m(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial p_m}{\partial n}(\mathbf{r}) - p_m(\mathbf{r}) \frac{\partial G_m}{\partial n}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \right] ds. \tag{6}$$

En esta expresión, $\mathbf{r}_0$ es el punto de observación, $\partial / \partial n$ representa la derivada normal saliente sobre el contorno Γ, ds es el diferencial de longitud de arco y α toma los valores usuales: 1 dentro de la región, $1/2$ sobre un contorno suave y 0 fuera de la región [11]. El contorno total de la celda unitaria se descompone como

$$\Gamma = \Gamma_{\mathrm{sup}} \cup \Gamma_{\mathrm{inf}} \cup \Gamma_{\mathrm{izq}} \cup \Gamma_{\mathrm{der}} \cup \Gamma_{\mathrm{inc}}, \tag{7}$$

donde los términos corresponden a las placas superior e inferior, las fronteras laterales periódicas y la interfaz con la inclusión.

Sobre las placas rígidas se impone una condición tipo Neumann, equivalente a anular la velocidad normal de partícula,

$$v_n = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{sobre} \quad \Gamma_{\mathrm{placas}}. \tag{8}$$

En las fronteras laterales de la celda unitaria se impone periodicidad de Bloch, de manera que el campo acústico conserva su forma al desplazarse un periodo y sólo adquiere un cambio de fase determinado por el vector de Bloch. Si Γ_{izq} y Γ_{der} están separadas por una distancia P, entonces [12]

$$p_j(x+P,y) = p_j(x,y)e^{ik_BP}, \qquad \frac{\partial p_j}{\partial n}(x+P,y) = \frac{\partial p_j}{\partial n}(x,y)e^{ik_BP}. \tag{9}$$

En la interfaz Γ_{inc} se imponen condiciones de acoplamiento para garantizar la continuidad del campo y la conservación de masa a través de la frontera. Definiendo $\mathbf{n}$ como la normal unitaria que apunta del medio 1 al medio 2, se exige continuidad de la presión y de la velocidad acústica normal, lo cual conduce a

$$p_1 = p_2, \qquad \frac{1}{\rho_1}\frac{\partial p_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2}\frac{\partial p_2}{\partial n} \quad \text{sobre} \quad \Gamma_{\mathrm{inc}}. \tag{10}$$

La ecuación integral se resuelve mediante discretización de frontera. El contorno Γ se divide en N elementos de longitud aproximadamente constante Δs. En este trabajo se utiliza $\Delta s = 0.0126\ \mathrm{m}$. Para cada segmento se define un punto de colocación y se adopta una aproximación de elemento constante; es decir, se supone que p y $\partial p/\partial n$ permanecen constantes dentro de cada elemento. Así, las integrales de frontera se convierten en sumas discretas y se obtiene un sistema lineal homogéneo acoplado cuyas incógnitas son los valores discretos de presión y derivada normal en los contornos correspondientes:

$$A(\omega, k_B)\mathbf{x} = 0. \tag{11}$$

Aquí, $\mathbf{x}$ agrupa las incógnitas discretas y la matriz A depende de la frecuencia y del vector de Bloch. La condición para la existencia de soluciones no triviales se establece mediante

$$\det[A(\omega, k_B)] = 0. \tag{12}$$

Finalmente, para evitar desbordamiento numérico durante el barrido espectral, se introduce la función

$$D(\omega) = \ln|\det[A(\omega, k_B)]|. \tag{13}$$

El barrido espectral se organiza en tres regímenes de frecuencia reducida: bajo, intermedio y alto. Esta división permite describir de manera sistemática la evolución modal y el confinamiento del campo en presencia de la inclusión semiconductora.

RESULTADOS

Los resultados numéricos se organizan en tres ventanas de frecuencia reducida: $\omega_r \in [0.5,2]$, $\omega_r \in [50,55]$ y $\omega_r \in [201.28,201.35]$. Para cada intervalo se identifican tres soluciones asociadas con mínimos de $D(\omega_r)$ y se presenta el mapa de intensidad del campo dentro de la celda unitaria. En las gráficas, la intensidad se reporta en una escala relativa normalizada entre 0 y 1, mientras que el factor multiplicativo indica el orden de magnitud del campo en cada caso.

Régimen de baja frecuencia

La Figura 2 muestra el comportamiento de $D(\omega_r)$ y las distribuciones de intensidad correspondientes en el régimen de baja frecuencia. En particular, la Figura 2(a) presenta la distribución de la función determinante, mientras que las Figuras 2(b)–2(d) muestran los mapas de intensidad del campo acústico calculados en las frecuencias seleccionadas.

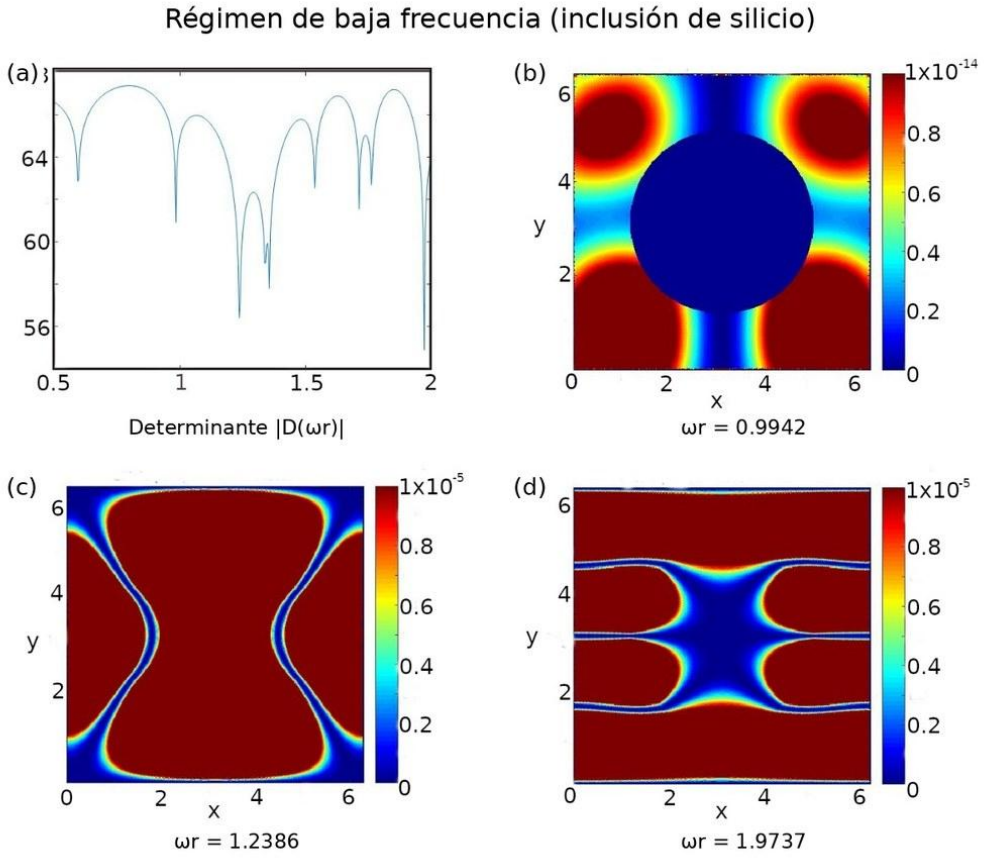


Figura 2. Régimen de baja frecuencia para la guía fonónica con inclusión de silicio: (a) determinante $D(\omega_r)$ en $\omega_r \in [0.5,2]$; (b)–(d) intensidad del campo para $\omega_r = 0.9942$, 1.2386 y 1.9737.

En este contexto, un nodo corresponde a una región espacial donde la amplitud del campo acústico es mínima o prácticamente nula. Un lóbulo es una región conectada donde el campo, o su intensidad normalizada, alcanza valores altos o máximos locales, y por lo general se encuentra separado de otros lóbulos por regiones o líneas nodales.

En la Figura 2(a) se identifican tres frecuencias candidatas para modos guiados: $\omega_r = 0.9942$, $\omega_r = 1.2386$ y $\omega_r = 1.9737$, correspondientes a tres mínimos del determinante $D(\omega)$. En la Figura 2(b), para $\omega_r = 0.9942$, la intensidad del campo se concentra principalmente en cuatro lóbulos ubicados cerca de las esquinas de la celda unitaria, mientras que la región central y una franja vertical exhiben comportamiento nodal. En la Figura 2(c), para $\omega_r = 1.2386$, la distribución se vuelve más extendida: una región de alta intensidad domina el interior de la celda, mientras que bandas curvas de baja intensidad aparecen cerca de las fronteras laterales, generando un patrón tipo reloj de arena. Finalmente, en la Figura 2(d), para $\omega_r = 1.9737$, el patrón se caracteriza por una región central de baja intensidad; alrededor de ella se observan cuatro lóbulos separados por líneas nodales horizontales. Además, aparecen dos lóbulos bien definidos en las regiones superior e inferior, los cuales cubren casi toda la altura de la guía.

En conjunto, el régimen de baja frecuencia presenta modos guiados con variaciones espaciales relativamente suaves, en los que la energía acústica se distribuye principalmente en la región de guiado y tiende a minimizarse dentro de la inclusión de silicio debido al contraste de propiedades materiales.

Régimen de frecuencia intermedia

De manera análoga a la Figura 2, la Figura 3 presenta el análisis para una ventana de frecuencia correspondiente al régimen intermedio. La Figura 3(a) muestra el determinante $D(\omega)$ y se seleccionan tres frecuencias asociadas con mínimos locales de esta función.

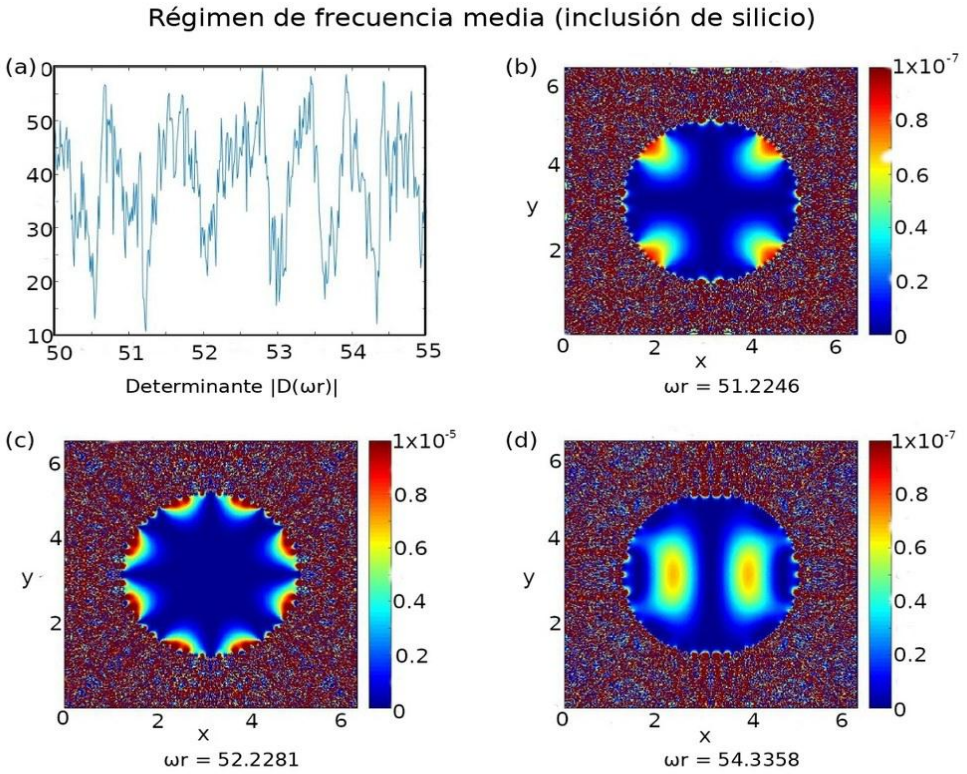


Figura 3. Régimen de frecuencia intermedia para la guía fonónica con inclusión de silicio: (a) determinante $D(\omega_r)$ en $\omega_r \in [50{,}55]$; (b)–(d) intensidad del campo para $\omega_r = 51.2246$, 52.2281 y 54.3358.

Para $\omega_r = 51.2246$, Figura 3(b), el campo se distribuye principalmente fuera de la inclusión; sin embargo, aparecen cuatro máximos cerca de la frontera de la inclusión, mientras que en el interior se observa una región de baja intensidad con simetría tipo cruz. Para $\omega_r = 52.2281$, Figura 3(c), el patrón se vuelve más complejo, con un aumento significativo en el número de lóbulos distribuidos a lo largo del perímetro de la inclusión; la región central permanece como un nodo único. Finalmente, para $\omega_r = 54.3358$, Figura 3(d), el campo dentro de la inclusión está dominado por dos lóbulos principales alargados en dirección vertical, separados por un nodo central.

En este régimen, el campo se reorganiza alrededor de la inclusión: el número de nodos y lóbulos aumenta respecto al caso de baja frecuencia y la distribución resultante muestra una mayor participación de la región de la inclusión. Esta respuesta indica que el contraste entre el aire y el silicio afecta de manera importante la forma modal conforme aumenta la frecuencia reducida.

Régimen de alta frecuencia

La Figura 4 presenta el análisis de alta frecuencia. El panel (a) muestra el determinante $D(\omega)$ y los paneles (b)–(d) corresponden a tres casos representativos. En la Figura 4(a) se identifican tres frecuencias candidatas para modos guiados. En la Figura 4(b), para $\omega_r = 201.2942$, el campo exhibe una estructura altamente compleja dentro de la inclusión, con múltiples lóbulos y líneas nodales ortogonales que producen una simetría global tipo cruz. En la Figura 4(c), para $\omega_r = 201.3037$, los máximos se reacomodan en un patrón cuasi radial; a medida que aumenta la distancia al centro de la inclusión, la intensidad disminuye y aparece una simetría semejante a una doble cruz. En la Figura 4(d), para $\omega_r = 201.3381$, la intensidad se agrupa en conjuntos de lóbulos ordenados predominantemente en la dirección vertical, mientras que las regiones nodales se forman tanto en el centro como a lo largo de los ejes principales.

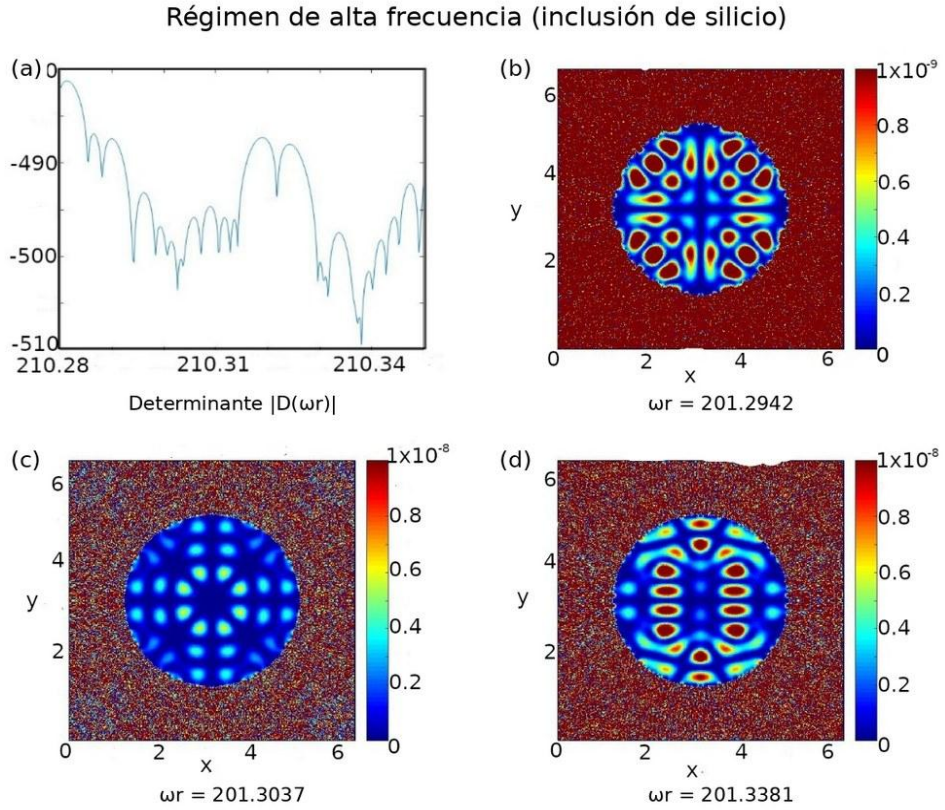


Figura 4. Régimen de alta frecuencia para la guía fonónica con inclusión de silicio: (a) determinante $D(\omega_r)$ en $\omega_r \in [201.28, 201.35]$; (b)–(d) intensidad del campo para $\omega_r = 201.2942$, 201.3037 y 201.3381.

En este intervalo, el campo muestra una sensibilidad marcada ante pequeñas variaciones de la frecuencia reducida. Dentro de una ventana espectral estrecha, la intensidad adquiere patrones más complejos, con un mayor número de lóbulos y líneas nodales. Esto sugiere que, en el régimen de alta frecuencia, la inclusión semiconductora funciona como una región activa para la reorganización modal del campo acústico.

CONCLUSIONES

En este trabajo se empleó el método de ecuaciones integrales para obtener la respuesta acústica de una guía fonónica periódica formada por dos placas rígidas y una inclusión cilíndrica de silicio. La imposición de condiciones de pared rígida tipo Neumann, periodicidad de Bloch y continuidad en la

interfaz aire–inclusión conduce a un sistema homogéneo cuya condición de existencia modal se identifica mediante el análisis de $D(\omega)$. Como resultado principal, para una fracción de llenado $f = 0.3$ y empleando las propiedades acústicas $\rho_1 = 1.293\,\mathrm{kg/m^3}$, $Z_1 = 427\,\mathrm{Rayls}$ para el aire y $\rho_2 = 2329\,\mathrm{kg/m^3}$, $Z_2 = 1.97 \times 10^7\,\mathrm{Rayls}$ para el silicio [10], se observó una distribución espacial de la presión acústica fuertemente dependiente de la frecuencia dentro de la celda unitaria. A bajas frecuencias, los patrones son relativamente suaves y extendidos. En cambio, a frecuencias intermedias y altas emergen configuraciones más complejas, con nodos, cambios de simetría y localización alrededor de la inclusión y de las regiones cercanas. En el régimen de alta frecuencia, la respuesta también muestra una alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la frecuencia reducida.

Los resultados indican que la formulación integral de frontera constituye una herramienta útil para estudiar guías fonónicas confinadas con inclusiones semiconductoras, ya que permite identificar modos guiados, reconstruir campos de presión e interpretar la localización modal sin necesidad de mallar todo el volumen de la celda. Este tipo de análisis puede contribuir al diseño de dispositivos acústicos y fonónicos para guiado selectivo, filtrado modal, confinamiento de energía y control de la propagación en sistemas periódicos con materiales de alto contraste de impedancia.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. I. Hussein, M. J. Leamy y M. Ruzzene, “Dynamics of phononic materials and structures: Historical origins, recent progress, and future outlook,” *Applied Mechanics Reviews*, vol. 66, núm. 4, art. 040802, 2014, doi: 10.1115/1.4026911.

[2] V. Laude, *Phononic Crystals: Artificial Crystals for Sonic, Acoustic, and Elastic Waves*. Berlin, Germany: De Gruyter, 2015.

[3] M. M. Sigalas y E. N. Economou, “Elastic and acoustic wave band structure,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 158, núm. 2, pp. 377–382, 1992, doi: 10.1016/0022-460X(92)90059-7.

[4] L. Brillouin, *Wave Propagation in Periodic Structures: Electric Filters and Crystal Lattices*, 2a ed. New York, NY, USA: Dover Publications, 1953.

[5] C. A. Brebbia y J. Dominguez, *Boundary Elements: An Introductory Course*, 2a ed. Southampton, U.K.: WIT Press, 1994.

[6] D. Colton y R. Kress, *Integral Equation Methods in Scattering Theory*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1983.

[7] F.-L. Li, Y.-S. Wang, Ch. Zhang y G.-L. Yu, “Boundary element method for band gap calculations of two-dimensional solid phononic crystals,” *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 37, núm. 2, pp. 225–235, 2013, doi: 10.1016/j.enganabound.2012.10.003.

[8] P. M. Morse y K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1968.

[9] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1981.

[10] Onda Corporation, “Acoustic Properties of Solids,” technical note, actualizada el 11 de abril de 2003.

[11] M. Abramowitz e I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 55. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1964.

[12] S. M. Kirkup, *The Boundary Element Method in Acoustics*. Hebden Bridge, U.K.: Integrated Sound Software, 2007.

ACOPLAMIENTO LEPTÓNICO DE UN NUEVO BOSÓN Z' EN EL CONTEXTO DEL MODELO B-L

María del Rocío Aparicio Méndez[1], Luz Adriana Cordero Cid[2], Carolina Enríquez Morales[3]

[1,2] Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Apdo,
[3] Facultad de Física, Universidad de Guadalajara,
mariadelrocio.aparicio@correo.buap.mx

RESUMEN

En este trabajo analizamos el Modelo B-L, construido a partir de una extensión del grupo de norma del Modelo Estándar. De tal modo, el Modelo B-L, tiene un nuevo bosón de norma denotado como Z', el cuál se puede acoplar a las partículas del SM por términos mediados por los parámetros libres del modelo. En el contexto del Modelo B-L, también se pueden definir nuevos campos fermiónicos, un nuevo bosón escalar y neutrinos masivos. Como parte de este trabajo nos interesamos en estudiar los acoplamientos del nuevo bosón de norma, Z', con fermiones del Modelo Estándar, para lo cual consideramos la siguiente metodología de estudio: analizamos el lagrangiano del modelo con el fin de deducir los vértices de interacción del sector de norma y se analizan los términos de interacción entre el Z y leptones del Modelo Estándar. De tal modo, en este trabajo se estudian procesos que involucren nueva física mediada por el bosón Z', de manera que se realizaron los cálculos de amplitudes y anchuras de decaimiento, teniendo como resultados las expresiones de dichos cálculos y el análisis numérico de los decaimientos del bosón Z'. Nuestros resultados son interpretados en relación a la probabilidad de que el bosón Z' cumpla con las cotas establecidas experimentalmente. En conclusión, con el análisis presentado se buscan indicios de nueva física, como la relacionada con la existencia del nuevo bosón Z', el cual podría ser detectado por sus acoplamientos a campos del Modelo Estándar. Así podemos decir que con la teoría propuesta, se pretende plantear la existencia de nuevos campos físicos.

INTRODUCCIÓN

El Modelo Estándar (SM) es actualmente la descripción matemática más exitosa de la física de altas energías. Sin embargo existen varias preguntas que no se responden con esta teoría, como la asimetría del Universo de materia y antimateria, la existencia y comportamiento de la materia oscura, las oscilaciones de los neutrinos o la masa de los neutrinos, entre otros; es por eso que en la búsqueda de nueva física ha surgido la necesidad de estudiar otros modelos construidos como extensiones del SM.

Los modelos extendidos se caracterizan por contar con un espectro de particulas ampliado en el sector de norma, fermiónico y/o escalar. Así en estos modelos se involucra y describe el comportamiento de los nuevos campos físicos, así como sus interacciónes con las partículas ya conocidas del Modelo Estándar. Con esta idea, en este trabajo analizamos el llamado Modelo B-L, basado en una simetría local relacionada con el grupo de norma $U(1)_{B-L}$, dónde B y L se relacionan con los números bariónicos y leptónicos, respectivamente, los cuales en el contexto del Modelo Estándar se vinculan con simetrías globales.

El modelo B-L, es un modelo extendido en el grupo de norma, el cual predice la existencia de un nuevo bosón de norma Z' que se puede acoplar a los fermiones del modelo estándar y a nuevas partículas. Dicho modelo, B-L, permite estudiar los acoplamientos del Z' a campos del modelo estándar, y también se caracteriza por tener un sector escalar extendido al considerar un nuevo siglete escalar introducido en la teoría. Con el fin de dar masa al nuevo bosón de norma Z', el singlete escalar anexado a la teoría se involucra en el rompimiento espontáneo de la simetría B-L. Después del rompimiento espontáneo de la simetría B-L, se generan términos de masa de Majorana, lo cual

facilita la implementación del mecanismo seesaw, cuya importancia radica en que predice la masa de los neutrinos derechos a la escala de la teoría de gran unificación, con esta teoría tambíen podría explicarse como generar la masa de neutrinos activos a la escala de eV.

En este trabajo nos enfocamos a estudiar los acoplamientos del nuevo bosón Z' a todos los fermiones del Modelo Estándar, en particular se analizan de forma genérica las anchuras de decaimiento del Z' a pares de fermiones, y se inicia el estudio de procesos de dos a dos cuerpos mediados por este nuevo bosón Z', todo con el fin de enfocarnos en la búsqueda de nueva física, más allá del Modelo Estándar.

TEORÍA

Con respecto al Modelo Estándar, la construcción del Modelo B-L involucra una nueva simetría relacionada con un grupo de norma abeliano, resultado de considerarse una extensión del grupo de norma del Modelo Estándar. De tal modo, el grupo de norma del modelo B-L, es dado como $SU(3)XSU(2)XU(1)XU(1)_{B\text{-}L}$. Así con la extensión del grupo de norma, en este modelo se identifica la generación de un nuevo bosón de norma, denotado como Z' y relacionado el grupo de norma $U(1)_{B\text{-}L}$. Este Z', se puede acoplar a las partículas del Modelo Estándar, dando así indicios de nueva física al estudiar interacciones entre fermiones que pueden ser mediadas por el nuevo bosón de norma.

Dado que la simetría que se anexa al modelo B-L es anómala y puede destruir la unitariedad e invariancia de la teoría por lo que se agregan neutrinos derechos con lo cual se asegura la cancelación de dicha anomalía. Cabe mencionar, qué al introducir los neutrinos derechos en dicho modelo, no solo se mantiene la consistencia matemática de la simetría de norma $U(1)_{B\text{-}L}$, sino que también se da pie a generar términos de masa para los neutrinos, introducir el mecanismo seesaw y considerar a los neutrinos masivos ligeros como posibles candidatos de materia oscura estéril. En el contexto más general, el modelo se puede construir considerando también fermiones de Dirac, los cuales se pueden estudiar como candidatos de materia oscura.

En este modelo extendido B-L se introduce un nuevo singlete escalar, el cual es relacionado con el grupo $U(1)_{B\text{-}L}$, y que se vincula con el rompimiento espontáneo de la simetría B-L y posterior surgimiento de la simetría de fondo Z_2. El nuevo singlete del modelo B-L también es necesario para generar la masa del bosón Z'. Con todo este contexto, se construye el lagrangiano de la teoría, de tal modo, los términos del lagrangiano del Modelo B-L que estudiamos son dados como:

$$-\frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + g_{B-L}Q_{X\chi}\bar{\chi}\gamma^{\mu}\chi Z'_{\mu} + g_{B-L}\sum_{l=e,\mu,\tau}Q_{Xl}\bar{l}\gamma^{\mu}lZ'_{\mu}$$

$$+ g_{B-L}\sum_{i=1,\dots,6}Q_{Xqi}\bar{q}_i\gamma^{\mu}q_iZ'_{\mu} + g_{B-L}\sum_{i=1,\dots,3}Q_{XNi}\overline{N_i}\gamma^{\mu}\gamma^5N_iZ'_{\mu}$$

donde $F'_{\mu\nu}$ es el nuevo tensor del grupo de norma $U(1)_{B\text{-}L}$ del modelo, Q_{Xf} es la carga B-L de cada fermión, g_{B-L} es la constante de acoplamiento del nuevo grupo de simetría B-L, Z'_{μ} es el nuevo campo vectorial, χ es un fermión de Dirac candidato a materia oscura, y N_i representa los tres neutrinos de Majorana.

Considerando que la masa de los neutrinos derechos es mucho mayor que la masa del Z', se estudian decaimientos de dicho bosón solo a fermiones del Modelo Estándar, de modo que nos

enfocamos a estudiar solo interacciones entre leptones y Z', los cuales están descritos por el siguiente término:

$$g_{B-L} \sum_{l=e,\mu,\tau} Q_{Xl} \bar{l}\, \gamma^{\mu} l Z'_{\mu}$$

del cual se deduce el acoplamiento dado como

$$i\, g_{B-L} Q_{Xl}\, \gamma^{\mu}$$

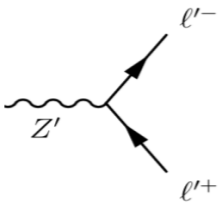
El estudio presentado se enfoca al estudio de los acoplamientos del Z' con los ferminones del Modelo Estándar y analizamos de manera general el decaimiento del Z' a un par de leptones, así como procesos de interacción de dos leptones a dos leptones mediados por un Z'. Dicho análisis de describe en la siguiente sección.

RESULTADOS

En este trabajo, nos enfocamos a estudiar la fenomenología del modelo B-L, particularmente se analizó el lagrangiano del modelo. De dicho análisis se determinaron las reglas de Feymann que describen los acoplamientos del Z' con los ferminones del Modelo Estándar, tienen la estructura antes mostrada y dada como:

$$i\, g_{B-L} Q_{Xl}\, \gamma^{\mu}$$

La investigación mostrada se oriento al estudio de las anchuras de decaimiento de nuevo bosón de norma Z' a dos leptones, dicho proceso tiene una representación general en diagrama de Feymann como se muestra en la siguiente figura:



La anchura de decaimiento del Z' a dos fermiones estaría dada como:

$$\Gamma\left(Z' \rightarrow l'^{-}\, l'^{+}\right) \propto \left(g_{B-L} Q_{Xl}\right)^2$$

En los estudios de estos decaimientos se usó la siguiente cota para la masa del Z':

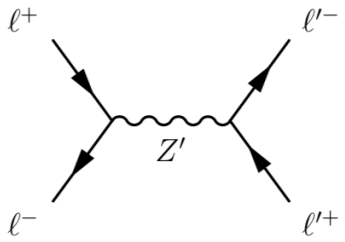
$$\mathbf{6520}\ \boldsymbol{GeV} > \boldsymbol{M_{Z'}} > \mathbf{5512}\boldsymbol{GeV}$$

con un valor $\boldsymbol{g_{B-L}} = \mathbf{0.2}$, obteniendo un

$$\mathbf{0.3} < \boldsymbol{BR_{Invisible}} < \mathbf{0.9}$$

considerando una energía de centro de masa $\sqrt{\boldsymbol{s}} = \mathbf{14}\boldsymbol{TeV}$. Con el fin de extender el estudio presentado, se inició una segunda etapa del trabajo que incluye el análisis de procesos de colisión de dos fermiones a dos fermiones, mediados por un bosón Z'.

El planteamiento del proceso $\boldsymbol{l'^{+}\, l'^{-}} \rightarrow \boldsymbol{Z'} \rightarrow \boldsymbol{l'^{+}\, l'^{-}}$, en el canal s, se presenta a continuación, teniendo un diagrama de Feymann como el mostrado en la siguiente figura:



Para este caso la amplitud del proceso es proporcional a:

$$|\boldsymbol{\mathcal{M}}\big(\, \boldsymbol{l'^{+}}(\boldsymbol{p_1})\, \boldsymbol{l'^{-}}(\boldsymbol{p_2}) \longrightarrow \boldsymbol{Z'} \longrightarrow \boldsymbol{l'^{+}}(\boldsymbol{p_3})\, \boldsymbol{l'^{-}}(\boldsymbol{p_4})\big)|^2 \propto \frac{\mathbf{8}\boldsymbol{g_{B-L}^4}}{[\boldsymbol{s^2} - \boldsymbol{m^2}]^2}$$

con $\boldsymbol{s} = \boldsymbol{p_1} + \boldsymbol{p_2}$, y teniendo una sección eficaz diferencial dada como:

$$\frac{\boldsymbol{d\sigma}(\mathbf{1,2} \rightarrow \mathbf{3,4})}{\boldsymbol{d\Omega}} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{64}\,\boldsymbol{\pi^2}\,\boldsymbol{E_{CM}^2}} \frac{|\boldsymbol{p}|}{|\boldsymbol{q}|}\, |\boldsymbol{\mathcal{M}}\big(\, \boldsymbol{l'^{+}}(\boldsymbol{p_1})\, \boldsymbol{l'^{-}}(\boldsymbol{p_2}) \longrightarrow \boldsymbol{Z'} \longrightarrow \boldsymbol{l'^{+}}(\boldsymbol{p_3})\, \boldsymbol{l'^{-}}(\boldsymbol{p_4})\big)|^2$$

Dicho análisis se dejó en una etapa inicial considerando solo la construcción de la expresión de la sección eficaz la cual se pretende analizar en un trabajo posterior.

CONCLUSIONES

En conclusión, en este trabajo se estudio el modelo B-L. Con el análisis presentado se buscan indicios de nueva física, como es la existencia de un nuevo bosón, Z'. Así podemos decir que con la teoría propuesta, se pretende plantear la existencia de nuevos campos físicos que interactuan directamente con las partículas del Modelo Estándar.

Agradecimiento: SNII-SECIHTI, PRODEP-SEP, VIEP-BUAP y LNS.

BIBLIOGRAFÍA

1. I. J. R. Aitchison and A. J. G. Hey, “Gauge Theories in Particle Physics” Press, 4th edition, 2012.
2. Farinaldo S. Queiroz, Jilberto Zamora-Saa, Ricardo C. Silva, and Y. M. Oviedo-Torres. “LHC and HL-LHC bounds on visible and invisible Z’ decays in the B-L model.” Physical Review D, 111(9): 095021, 2025.

POLARIMETRÍA DE STOKES BASADA EN MODULACIÓN ELECTRÓNICA MEDIANTE RETARDADORES DE CRISTAL LÍQUIDO

Enrique Faqui Betancourt Guadarrama, Geliztle Alejandra Parra Escamilla, Joel Cervantes-L
Héctor Octavio González Ochoa, Citlalli Almaguer Gómez, David Serrano García

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara.
Guadalajara, Jalisco, Mexico.
faqui.betancourt@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Presentamos un módulo de polarimetría de Stokes con modulación electrónica para la caracterización rápida del estado de polarización sin elementos mecánicos rotatorios. El sistema utiliza retardadores variables de cristal líquido (LCVR) como moduladores de fase controlados por voltaje, un analizador lineal y un fotodetector para medir la intensidad transmitida. La excitación periódica de los LCVR genera señales armónicas que codifican los parámetros de Stokes. Se implementa un flujo de adquisición y procesamiento que incluye normalización, demodulación en frecuencia, ajuste paramétrico y calibración mediante estados conocidos, con el fin de corregir desalineaciones y ganancias. La arquitectura modular permite su operación independiente o su integración en sistemas de imagen, con sincronización mediante disparo externo.

INTRODUCCIÓN

La polarimetría de Stokes permite la caracterización completa del estado de polarización y se utiliza ampliamente en metrología óptica e imagen. En muchas aplicaciones, la resolución temporal está limitada por la rotación mecánica de los analizadores. Los polarímetros modulados electrónicamente mediante LCVR ofrecen compacidad y eliminan partes móviles, lo que permite realizar mediciones más rápidas. Este trabajo se enfoca en un polarímetro de Stokes de doble LCVR, diseñado para modulación de alta velocidad y para su implementación práctica en un sistema de adquisición sincronizado, donde los parámetros de Stokes se recuperan a partir del contenido armónico de la intensidad detectada. [1-2].

METODOLOGIA

El sistema propuesto se muestra en la Fig. 1. Un generador de estados de polarización, compuesto por un polarizador lineal y una placa de cuarto de onda, genera el estado de entrada, el cual es analizado por un módulo de Stokes de doble LCVR, con los LCVR orientados a 0° y 45°, un analizador lineal y un fotodetector. Una DAQ aplica voltajes de excitación sincronizados a ambos LCVR y, simultáneamente, adquiere la intensidad detectada para la reconstrucción del vector de Stokes basada en ciclos. La Fig. 1 muestra la arquitectura opto-electrónica y el flujo de señal desde la modulación hasta la reconstrucción de Stokes. [2]

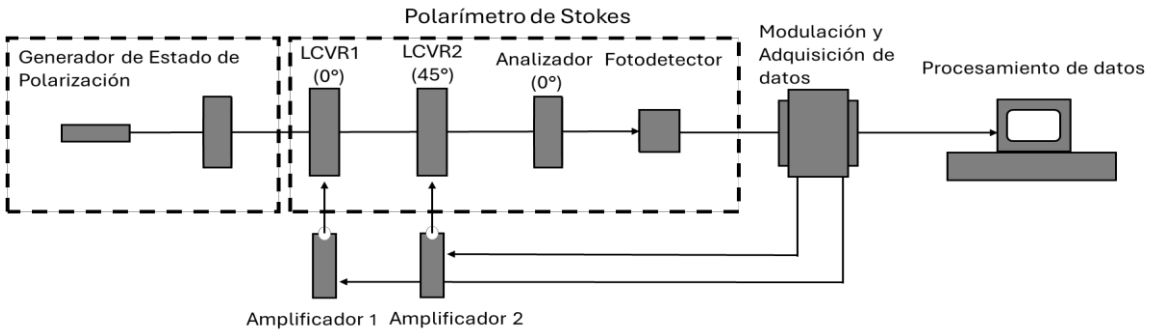


Fig. 1. Diagrama de bloques del polarímetro de Stokes modulado electrónicamente: analizador de doble LCVR, excitación síncrona, fotodetección, adquisición, sistema de modulación y adquisición con una PC para el procesamiento de datos y el cálculo del vector de Stokes de un haz de muestra.

TEORÍA

La respuesta del sistema polarimétrico se modela mediante el formalismo de Stokes–Mueller. Bajo este enfoque, el estado de polarización incidente se representa mediante el vector de Stokes de entrada $\boldsymbol{S_{in}}$, mientras que el estado de polarización después de atravesar el sistema óptico queda descrito por el vector de Stokes de salida $\boldsymbol{S_{out}}$. Para el arreglo propuesto, la propagación del haz puede escribirse como,

$$\boldsymbol{S_{out} = LP[0°]\, LR[45°, 2\delta]\, LR[0°, \delta]\, S_{in}}. \quad (1)$$

La intensidad detectada fue derivada analíticamente utilizando el formalismo de Stokes–Mueller, donde (LP) representa un polarizador lineal orientado a 0°, y (LR) representa un retardador lineal con una orientación y una retardancia determinadas. El estado de polarización incidente se describe mediante el vector de Stokes $\mathbf{S_{in}} = [\boldsymbol{S_0, S_1, S_2, S_3}]^{\boldsymbol{T}}$, mientras que la respuesta del sistema está dada por el vector de Stokes de salida $\mathbf{S_{out}}$. El sistema utiliza dos retardadores variables de cristal líquido (LCVR) orientados a 0° y 45°, los cuales introducen retardancias $\boldsymbol{\delta}$ y $\boldsymbol{2\delta}$, respectivamente. La intensidad medida corresponde a la primera componente del vector de Stokes de salida y puede expresarse como una función armónica de $\boldsymbol{\delta}$,

$$\boldsymbol{I = \frac{1}{4}(2S0 + S2Cos[\delta] + 2S1Cos[2\delta] - S2Cos[3\delta] - S3Sin[\delta] - S3Sin[3\delta])}. \quad (2)$$

Esta expresión muestra que los parámetros de Stokes del haz incidente quedan codificados en diferentes componentes armónicas de la señal de intensidad detectada. En particular $\boldsymbol{S_1}$, $\boldsymbol{S_2}$, $\boldsymbol{S_3}$ aparecen asociados a términos de seno y coseno de distinto orden. Por lo tanto, al aplicar un análisis basado en Fourier sobre la intensidad detectada, es posible extraer los coeficientes armónicos correspondientes y reconstruir los parámetros del vector de Stokes de entrada sin emplear una rotación mecánica.

PARTE EXPERIMENTAL

La Fig. 2 muestra el montaje experimental, compuesto por el generador de estado de polarización, el módulo polarimétrico de Stokes y la etapa sincronizada de modulación y adquisición de datos.

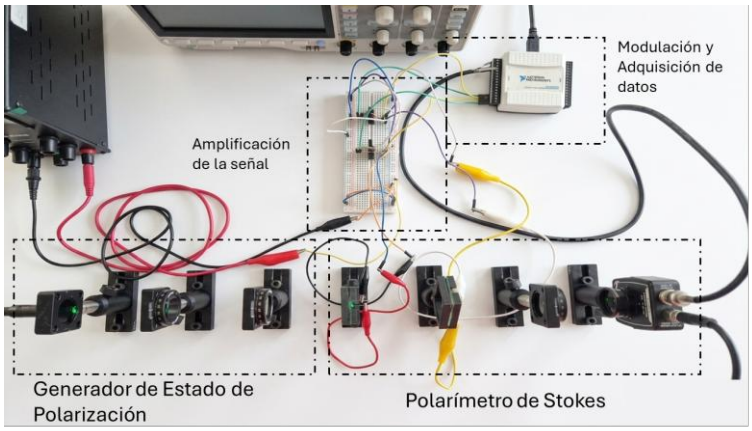


Fig. 2. Esquema experimental del polarímetro de Stokes modulado electrónicamente, donde la intensidad detectada se adquiere de forma sincronizada para recuperar los parámetros de Stokes mediante análisis armónico.

Como parte del desarrollo del sistema, se implementó un arreglo óptico para la modulación y análisis de estados de polarización mediante celdas retardadoras de cristal líquido. En Fig. 3 se muestra la sección experimental del módulo, donde los elementos ópticos se encuentran montados sobre una mesa óptica y conectados al sistema de control electrónico. Esta configuración permite registrar variaciones de intensidad asociadas al cambio de retardancia inducido por voltaje, lo cual es fundamental para la recuperación de parámetros polarimétricos mediante demodulación armónica.

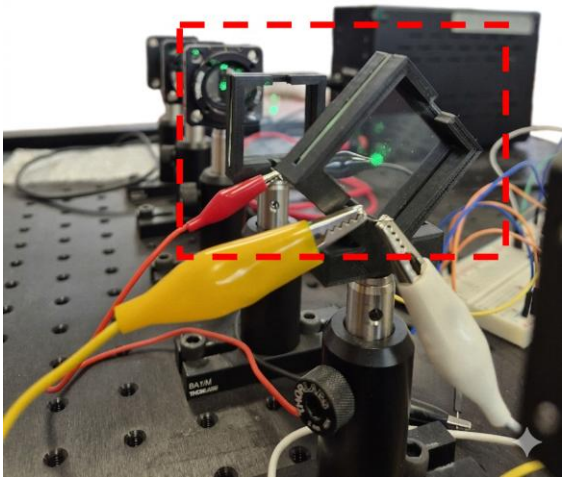


Fig. 3. Celdas LCVR empleadas en el sistema polarimétrico. La región marcada en rojo muestra los retardadores variables de cristal líquido integrados al montaje experimental.

RESULTADOS

La validación experimental se realizó con estados de entrada linealmente polarizados. La respuesta medida permitió identificar el intervalo de tensión no saturado y estable de los LCVR, estableciendo la región de operación efectiva para el análisis armónico y la recuperación polarimétrica.

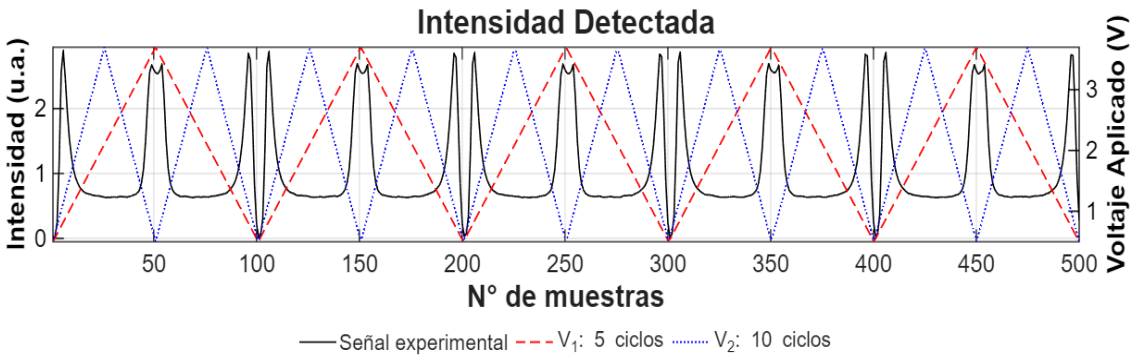


Fig. 4. Intensidad detectada experimentalmente y tensiones de excitación reales aplicadas a los dos LCVR bajo excitación de doble frecuencia.

A partir de la señal experimental presentada en la Fig. 4 se realizó una selección del intervalo efectivo de operación de la celda retardadora, excluyendo las regiones asociadas a saturación y respuesta no lineal. La señal resultante conserva la modulación periódica de la intensidad producida por la variación de retardancia inducida electrónicamente. Este procesamiento permite trabajar con una región más estable de la respuesta óptica, adecuada para la posterior extracción de coeficientes armónicos mediante análisis de Fourier y para la recuperación de información polarimétrica.

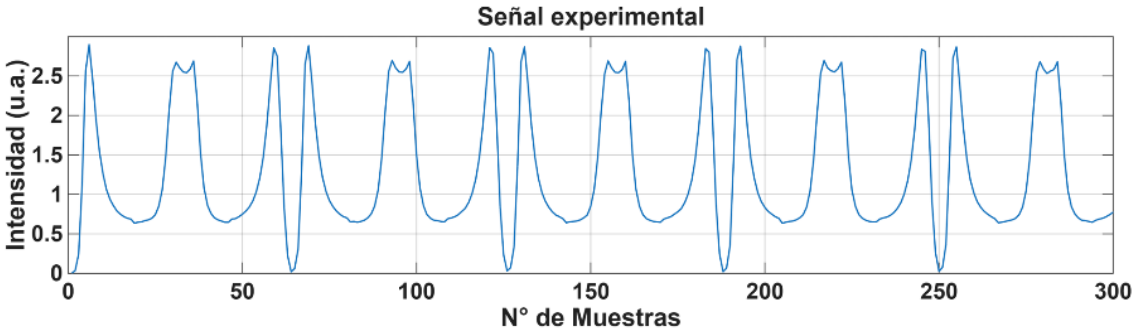


Fig. 5. Intensidad experimental reconstruida en el intervalo no saturado del LCVR. El recorte excluye regiones de respuesta no lineal y conserva la zona útil para la demodulación armónica y la recuperación de los parámetros de Stokes.

Como se observa en la Fig. 5, la señal seleccionada mantiene una respuesta periódica adecuada para el análisis armónico, evitando las zonas donde la respuesta óptica de la celda presenta saturación o comportamiento no lineal.

La validación angular se realizó utilizando estados de entrada con polarización lineal a ángulos conocidos, generados mediante la rotación del polarizador lineal. En la Fig. 6 se muestra la comparación entre el ángulo de polarización lineal recuperado experimentalmente el AoLP recuperado experimentalmente fue comparado con la referencia ideal, mostrando una respuesta monótona acorde con el comportamiento esperado. El error RMS obtenido fue de 6.95°, lo que indica una concordancia preliminar adecuada, aunque aún se observan desviaciones asociadas a la calibración, alineación óptica y no idealidades del sistema.

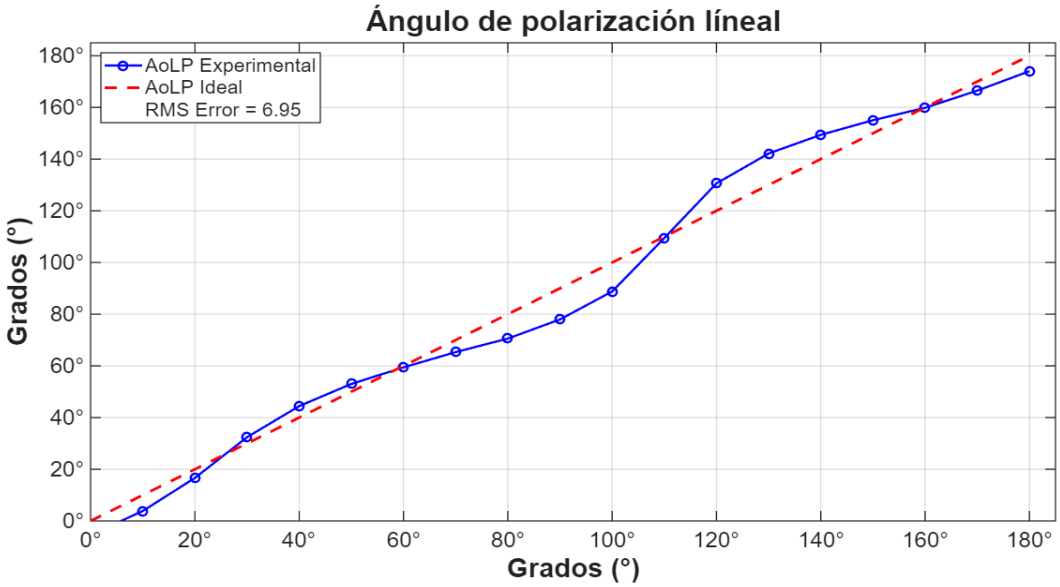


Fig. 6. Validación experimental del ángulo de polarización lineal (AoLP) obtenido mediante la rotación del polarizador lineal en el generador de estado de polarización y la comparación de los valores medidos con la referencia angular ideal correspondiente. La comparación arrojó un error RMS de 6,95.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado hasta el momento permitió caracterizar experimentalmente la respuesta de una celda de cristal líquido en función del voltaje aplicado, identificando una región de operación adecuada para evitar zonas de saturación. Posteriormente, con la implementación de dos celdas, se obtuvo una señal de intensidad con contenido armónico, la cual fue demodulada mediante funciones seno y coseno para extraer coeficientes relacionados con los parámetros de Stokes. Estos resultados preliminares muestran la viabilidad de desarrollar un sistema polarimétrico compacto, de bajo costo y sin rotación mecánica durante la adquisición.

BIBLIOGRAFÍA

1. D. H. Goldstein, Polarized Light, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011.
2. R. A. Chipman, W.-S. T. Lam, and G. Young, Polarized Light and Optical Systems. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
3. J. M. Bueno, “Polarimetry using liquid-crystal variable retarders: theory and calibration,” J. Opt. A: Pure Appl. Opt., vol. 2, no. 3, pp. 216–222, 2000.
4. J. M. Bueno, “Polarimetry using liquid-crystal variable retarders: Theory and calibration,” Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, vol. 2, no. 3, pp. 216–222, 2000.

OLEDS CON EMISIÓN AZUL PROFUNDO MEDIANTE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA TIPO FRET Y FABRICADOS POR MÉTODOS HÚMEDOS

Anderson Alvarez-Quesada[1,2]*, Gabriel Ramos-Ortiz[1], José-Luis Maldonado[1]*, Gerardo González-García[2]

[1] Centro de Investigaciones en Óptica A.C., [2] Departamento de Química, Universidad de Guanajuato.

anderson.alvarez@cio.mx, jlmr@cio.mx.

RESUMEN

En este trabajo se desarrollaron OLEDs azules procesados en solución mediante spin-coating y fabricados bajo condiciones atmosféricas, empleando un cátodo no evaporado de Field's metal (In/Sn/Bi). La emisión azul profunda se obtuvo mediante transferencia de energía por resonancia de Förster (FRET) desde un complejo boro-bencimidazol (BC2) hacia un polifluoreno (PFN). En dispositivos con arquitectura tricapa (PEDOT:PSS/BC2:PVK/PFN), la variación del espesor de PFN (5–25 nm) permitió modular la emisión desde azul (426 nm) hasta cian (490 nm), alcanzando una luminancia máxima de 1148 cd/m², una eficiencia de corriente de 24 cd/A y una EQE de 1,27 %. Por su parte, los dispositivos bicapa (PEDOT:PSS/BC2:PFN) favorecieron una transferencia FRET más eficiente y luminancias superiores a 1000 cd/m². Los OLEDs con 2,5 y 5 % p/p de PFN exhibieron emisión azul profunda (CIEy < 0,1), mientras que con 10 % alcanzaron una eficiencia de corriente de 11,8 cd/A y una EQE de 1,85 %. Estos resultados superan ampliamente los reportados previamente para OLEDs con cátodos eutécticos no evaporados y demuestran un desempeño competitivo frente a dispositivos azules fabricados mediante técnicas de evaporación térmica.



Figura a

INTRODUCCIÓN

Los diodos orgánicos emisores de luz (OLEDs) constituyen una tecnología fundamental para pantallas de alta resolución y aplicaciones de iluminación de estado sólido debido a su elevada eficiencia energética, rápido tiempo de respuesta, amplio ángulo de visión y excelente pureza de color.[1–3] Entre los colores primarios utilizados en estos dispositivos, la emisión azul desempeña un papel crucial por su alta energía y por ser indispensable para la generación de luz blanca.[4] Sin embargo, a pesar de los avances alcanzados en OLEDs azules y de azul profundo (< 450 nm),[5,6] su desempeño continúa siendo inferior al de los dispositivos emisores en las regiones verde y roja.[7,8]

Las tecnologías fosforescentes y basadas en fluorescencia retardada activada térmicamente (TADF) han permitido alcanzar eficiencias cuánticas internas cercanas al 100 %.[9] No obstante, los OLEDs fosforescentes presentan limitaciones relacionadas con su estabilidad, vida útil y el uso de metales de transición costosos,[9,10] mientras que los dispositivos TADF suelen experimentar pérdidas de eficiencia asociadas a procesos de desactivación no radiativa.[11] Por ello, el desarrollo de nuevos

materiales emisores en el azul profundo con alta eficiencia, estabilidad y bajo costo sigue siendo un reto importante.

En este contexto, los compuestos de boro tetracoordinado basados en ligandos N,O han emergido como materiales prometedores debido a sus destacadas propiedades fotofísicas y su capacidad para generar emisiones en la región azul y azul profundo.[12–14] Diversos complejos de boro han demostrado buen desempeño en OLEDs, alcanzando luminancias superiores a 2000 cd/m^2 y eficiencias competitivas. Particularmente, compuestos derivados de benzimidazol han permitido obtener emisiones cercanas a 440 nm, características de la región de azul profundo.[13]

Recientemente, nuestro grupo reportó la síntesis y caracterización fotofísica de una serie de complejos difluoroboro emisores en la región azul.[15] Entre ellos, el compuesto BC2 destacó por presentar emisión de azul profundo a 438 nm, una eficiencia cuántica de fluorescencia superior al 40 %, buena procesabilidad desde solución y elevada estabilidad térmica, lo que lo convierte en un candidato atractivo para aplicaciones en OLEDs.

Paralelamente, la reducción de los costos de fabricación constituye otro desafío para la tecnología OLED. Aunque los dispositivos procesados completamente en solución representan una alternativa atractiva, muchos aún requieren la deposición del cátodo mediante evaporación al vacío.[16,17] Como alternativa, se han explorado cátodos procesados en solución, incluyendo aleaciones eutécticas de bajo punto de fusión como el Field's metal (Bi/In/Sn). Sin embargo, su implementación en OLEDs ha sido poco estudiada y los dispositivos reportados hasta ahora han mostrado desempeños limitados.[18,19]

En este trabajo se evalúa un sistema anfitrión–huésped basado en BC2:PFN como capa emisora en OLEDs azules completamente procesados en solución y fabricados bajo condiciones atmosféricas, utilizando Field's metal como cátodo no evaporado. Los dispositivos desarrollados exhibieron emisiones ajustables entre azul y cian, así como una electroluminiscencia azul profunda con coordenadas cromáticas CIEy inferiores a 0.1, demostrando el potencial de esta estrategia para la fabricación de OLEDs eficientes y de bajo costo.

PARTE EXPERIMENTAL

Fabricación y caracterización de los OLEDs

Los dispositivos OLEDs se fabricaron sobre sustratos de ITO previamente lavados y tratados con plasma de oxígeno. Todas las capas orgánicas se depositaron por spin-coating bajo condiciones atmosféricas. Se fabricaron dispositivos con arquitectura vidrio/ITO/PEDOT:PSS/BC2:PVK/ PFN/FM. La incorporación de PVK permitió evitar la remoción total de BC2 durante la deposición de PFN. El espesor de la capa de PFN se modificó variando las condiciones de deposición para estudiar su efecto sobre las propiedades electroluminiscentes. Además, se desarrollaron dispositivos con arquitectura simplificada vidrio/ITO/PEDOT:PSS/BC2:PFN/FM, empleando diferentes concentraciones de PFN (2.5, 5 y 10 % p/p) directamente mezcladas con BC2. Finalmente, la aleación eutéctica FM se depositó como cátodo mediante drop-casting a 95 °C.

Las curvas de densidad de corriente-luminancia-voltaje (J-V-L) se registraron mediante un electrómetro Keithley 2400 acoplado a un sistema de detección calibrado. Los espectros de electroluminiscencia y las coordenadas cromáticas CIE se determinaron utilizando un espectrómetro StellarNet. La eficiencia cuántica externa (EQE) se calculó a partir de los datos eléctricos y ópticos obtenidos. La topografía superficial y el espesor de las películas se analizaron mediante microscopía de fuerza atómica (AFM), realizando mediciones en diferentes regiones de cada muestra para obtener valores promedio y sus desviaciones estándar.

La ocurrencia de transferencia de energía por resonancia de Förster (FRET) se investigó mediante espectroscopía de absorción, fotoluminiscencia y medidas de tiempos de vida de fluorescencia en

películas de BC2 y PFN. Los tiempos de vida se determinaron mediante la técnica de conteo de fotones correlacionados en el tiempo (TCSPC), utilizando excitación a 300 nm. Los decaimientos de fluorescencia se ajustaron mediante modelos biexponenciales para calcular los tiempos de vida promedio y evaluar la eficiencia de los procesos de transferencia de energía.

RESULTADOS

Propiedades de electroluminiscencia de los OLEDs

Los niveles de energía de los OLEDs tricapas y bicapas se muestran en la **Figura 1**. Asimismo, los resultados obtenidos para OLEDs con la arquitectura vidrio/ITO/PEDOT:PSS(35nm)/ BC2:PVK(17nm)/PFN(5-25nm)/FM se muestran en la **Figura 2**. Para fines prácticos, los OLEDs se denominaron **1**, **2**, **3**, **4** y **5** para un espesor PFN de 5, 7, 10, 15 y 25 nm, respectivamente. Los parámetros de desempeño de todos los dispositivos fabricados se resumen en la **Tabla 1**.

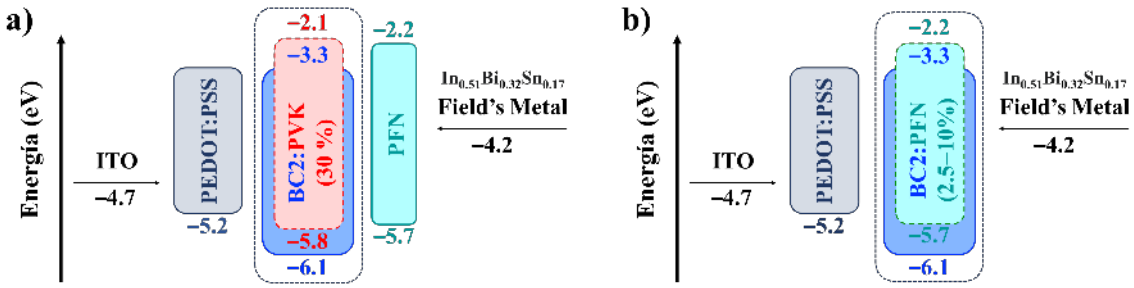


Figura 1. Representación esquemática de los niveles de energía de los materiales utilizados en los dispositivos OLEDs fabricados a) tricapa y b) bicapa.

Los espectros de electroluminiscencia y las coordenadas cromáticas de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) se muestran en las **Figuras 2a** y **2b**, respectivamente. Los resultados evidencian una clara modulación del color de emisión conforme aumenta el espesor de la capa de PFN. En particular, el OLED **1** presenta un espectro de electroluminiscencia dominado por las características típicas de emisión del PFN, con una banda principal centrada alrededor de 426 nm y un hombro de menor intensidad cercano a 440 nm. Este comportamiento sugiere que la recombinación de cargas ocurre principalmente dentro de la capa de PFN o en la interfaz entre PFN y BC2:PVK.

Además de la banda azul, el OLED **1** exhibe una señal adicional alrededor de 490 nm cuya intensidad aumenta progresivamente al incrementar el espesor de la capa de PFN en los OLEDs **2**–**5** (ver **Figura 2a**). Este fenómeno se atribuye a la formación de excímeros fluoreno–fluoreno característicos de materiales basados en polifluoreno,[20,21] lo que provoca un desplazamiento gradual de la emisión desde azul profundo hacia tonalidades cian. Esta evolución también se refleja en las coordenadas de color CIE, donde el parámetro CIEy aumenta de 0.15 a 0.31 al pasar del OLED **1** al **5** (**Tabla 1**), confirmando la transición progresiva de color inducida por el incremento del espesor de PFN.

Tabla 1. Rendimiento de OLEDs fluorescentes azules procesados en solución fabricados en este trabajo (**1–8**)

OLEDs	V_{on} V	L_{max} cd/m^2	CE_{max} cd/A	EQE_{max} %	$\lambda_{em(max)}$ nm	CIE (x,y)
1	4.4	817	0.5	0.07	426	0.18, 0.15
2	4.5	871	1.2	0.15	426	0.18, 0.16
3	5.0	864	1.3	0.11	426	0.19, 0.23

4	4.5	925	1.5	0.12	490	0.19, 0.28
5	5.4	1148	24.3	1.27	488	0.18, 0.31
6	5.5	1076	2.2	0.40	428	0.16, 0.09
7	4.6	1067	5.7	0.99	428	0.16, 0.10
8	5.9	1087	11.8	1.85	428	0.16, 0.11

La **Figura 2c** muestra las curvas corriente-voltaje-luminancia (J-V-L), y la **Figura 2d** muestra la eficiencia de corriente de los dispositivos de tres capas. Los OLEDs **1**–**5** con espesores de capa PFN que iban de 5 a 15 nm presentaban voltajes de encendido (V_{on}) de 4.4 a 5.0 V y valores de luminancia máxima (L_{max}) entre 817 y 925 cd/m^2 (véase la **Tabla 1**). Por otro lado, para un espesor PFN de 25 nm (OLED **5**) se observó un L_{max} de 1148 cd/m^2, acompañado de un V_{on} de 5.4 V (**Figura 2c** y **Tabla 1**). Además de modificar el color de emisión, el incremento del espesor de la capa de PFN produjo una mejora significativa en el desempeño de los dispositivos, reflejada en un aumento progresivo de la eficiencia de corriente (CE) (**Figura 2d**, **Tabla 1**). Mientras que el dispositivo **1** presentó emisión azul con una CE de apenas 0.5 cd/A, el dispositivo **5** alcanzó una CE de 24.3 cd/A (**Tabla 1**), acompañada de una emisión azul verdosa. Este comportamiento puede atribuirse a la formación de excímeros en la capa de PFN, que favorecen una región de recombinación de carga más extensa y uniforme, incrementando la probabilidad de recombinación radiativa y, por tanto, la luminancia.

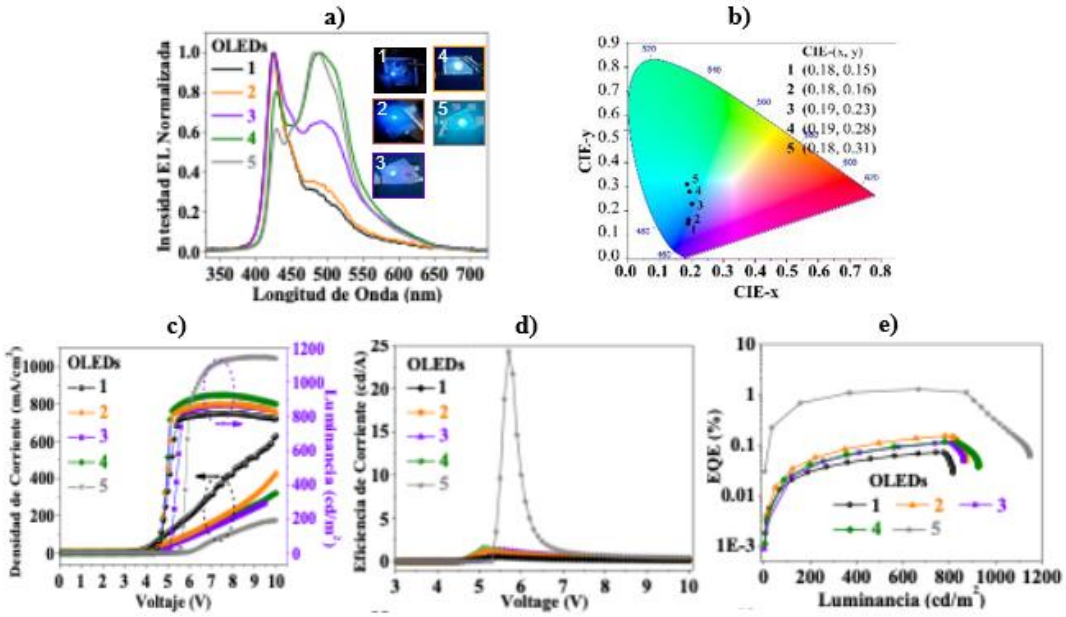


Figura 2. Características de los OLEDs tricapas con estructura: vidrio/ITO/PEDOT:PSS/BC2:PVK-30%/PFN/FM, con diferentes espesores de PFN (5, 7, 10, 15 y 25 nm); a) espectros EL normalizados, b) diagrama de cromaticidad CIE-1931, c) densidad de corriente–voltaje–luminancia, d) eficiencia de corriente y e) eficiencia cuántica externa.

La eficiencia cuántica externa (EQE) se determinó a partir de los gráficos J-V, L-V y el espectro de electroluminiscencia (EL), mediante el enfoque elemental reportado por Shukla M. y colaboradores.[22] En general, se observó una disminución de la EQE al aumentar la luminancia (efficiency roll-off), fenómeno que podría estar relacionado con un desbalance en la inyección de cargas y con el efecto de lavado parcial de la capa emisora durante la deposición de PFN (**Figura 2e**). Entre los dispositivos estudiados, el OLED **5** mostró el mejor desempeño, alcanzando una EQE máxima de 1.27 % a una luminancia de 670 cd/m^2 (**Tabla 1**). En contraste, los dispositivos con capas más delgadas de PFN (**1**–**4**) presentaron valores de EQE inferiores al 0.2 %, debido a sus bajas luminancias y a la elevada densidad de corriente observada.

Con el objetivo de minimizar la emisión cian asociada con la formación de excímeros de PFN y obtener una electroluminiscencia azul profunda más pura, se fabricaron dispositivos OLEDs con arquitectura bicapa (vidrio/ITO/PEDOT:PSS/BC2:PFN/FM) empleando una estrategia tipo anfitrión–huésped, donde BC2 actuó como anfitrión y PFN como huésped en concentraciones de 2.5, 5 y 10 % p/p (dispositivos **6**–**8**) y los resultados son mostrados en la **Figura 3**. En esta configuración, la emisión azul profunda se genera mediante transferencia de energía por resonancia de Förster (FRET) desde BC2 hacia PFN. Los espectros de electroluminiscencia (**Figura 3a**) mostraron una banda principal alrededor de 428 nm y una señal mucho menos intensa a 490 nm en comparación con los dispositivos tricapa, evidenciando la mitigación de excímeros. Como consecuencia, se obtuvieron emisiones azul profundo más puras y estrechas (FWHM ≈ 25 nm), con coordenadas cromáticas CIEy de 0.09 y 0.10 para los OLEDs **6** y **7**, respectivamente, mientras que el dispositivo **8** presentó un valor ligeramente superior (CIEy = 0.11) (ver **Figura 3b**, **Tabla 1**).

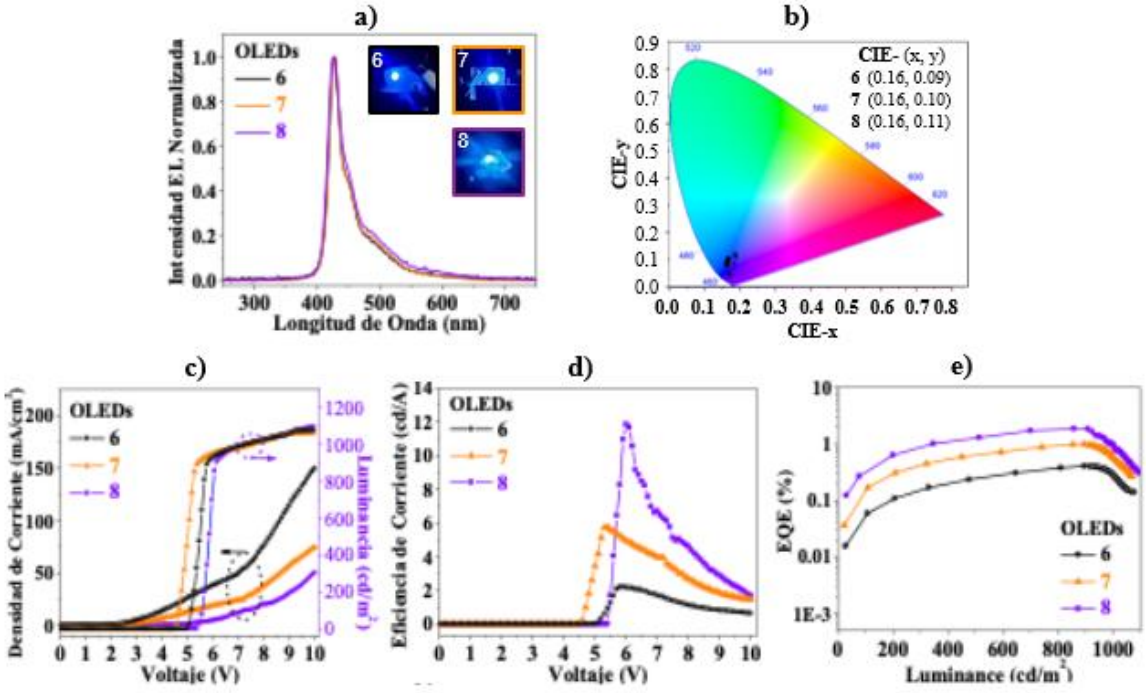


Figura 3. Características de los OLED bicapas con estructura: vidrio/ITO/PEDOT:PSS/ BC2:PFN/FM, con diferentes porcentajes de dopaje de PFN (2,5, 5 y 10 %); a) espectros EL normalizados, b) diagrama de cromaticidad CIE-1931, c) características de densidad de corriente–voltaje–luminancia, d) eficiencia de corriente y e) eficiencia cuántica externa.

Además de mejorar la pureza de color, la arquitectura bicapa incrementó significativamente el desempeño de los dispositivos. Las luminancias máximas superaron los 1000 cd/m^2 (**Figura 3c**, **Tabla 1**) y las eficiencias de corriente alcanzaron valores de 2.2, 5.7 y 11.8 cd/A para **6**, **7** y **8**, respectivamente (**Figura 3d**, **Tabla 1**). De manera similar, la EQE máxima aumentó de 0.40 % a 1.85 % al incrementar la concentración de PFN (**Figura 3e**, **Tabla 1**). Estos resultados indican que la reducción de la formación de excímeros mediante la estrategia anfitrión–huésped favorece tanto la calidad cromática como la eficiencia de los OLEDs.

Finalmente, al comparar estos dispositivos con OLEDs azules reportados previamente en la literatura,[2,13,14,23–30] presentan un desempeño competitivo, e incluso superior en algunos casos, pese a haber sido fabricados completamente mediante procesos en solución y utilizando un cátodo eutéctico no evaporado. Asimismo, todos los dispositivos desarrollados en este trabajo mostraron mejoras significativas respecto a los pocos OLEDs reportados previamente con cátodos de Field's Metal, alcanzando luminancias aproximadamente diez veces mayores.

Transferencia de energía por resonancia de Förster de BC2 a PFN

La transferencia de energía por resonancia de Förster entre BC2 y PFN en los dispositivos bicapas se evaluó mediante espectros de absorción, fotoluminiscencia, excitación y tiempos de vida de fluorescencia de diferentes películas: i) BC2:PS (2,5 % PS); ii) PS:PFN (2,5 % PFN) y iii) BC2:PFN (2,5 % PFN), empleando i y ii como sistemas de referencia. Los espectros de absorción de la película BC2:PFN mostraron las contribuciones características de ambos componentes, con absorbancias en 300–380 nm correspondientes a BC2 y 350–425 nm debidas a PFN (**Figura 4a**). Por su parte, los espectros de fotoluminiscencia registrados con excitación a 300 nm (**Figura 4b)** mostraron una débil emisión del huésped (PFN) en la película de PS:PFN, mientras que la emisión del anfitrión (BC2) en la película de BC2:PS es mucho más fuerte. Por lo tanto, y de acuerdo con el proceso FRET,[31,32] se observa una fuerte emisión del huésped (picos principal y secundario a 428 nm y 450 nm) en el espectro de la película de BC2:PFN (**Figura 4b)**.

Los espectros de excitación también respaldan la afirmación de que BC2 puede transferir energía a PFN. **La Figura 4c** presenta los espectros de excitación con detección a 500 nm. De estos espectros se deduce que, bajo excitación directa a 300 nm, la emisión de PFN en la película PS:PFN es insignificante, pero se ve sustancialmente mejorada en la mezcla de BC2:PFN. El mecanismo FRET acorta la vida útil de fluorescencia de BC2 dada por 5,3 ns en ausencia de PFN hasta 3,7 ns en presencia de PFN, lo que indica una eficiencia FRET del 30 % ($E_{FRET} = 1–(\tau_{DA}/\tau_D)$; τ_{DA} = tiempo de vida media de fluorescencia del donador en presencia del aceptor; τ_D = tiempo de vida media de fluorescencia del donador). La eficiencia FRET en dispositivos bicapas fue mayor que en dispositivos de tricapas (25%), atribuida a la mayor proximidad entre las moléculas donadoras y aceptoras en la configuración de dos capas.

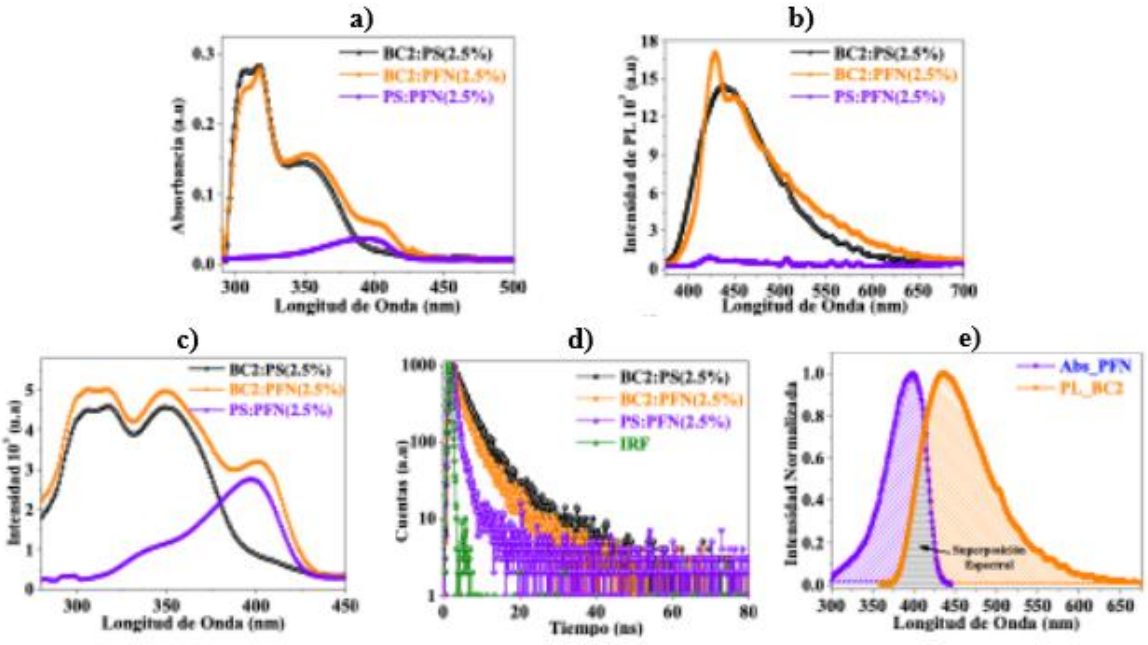


Figura 4. Espectros de a) absorción, b) emisión y c) excitación (Emi. Det. 500 nm), d) curvas de decaimiento de fluorescencia (Emi. Det. 500 nm) de películas BC2:PS, PS:PFN y BC2:PFN; e) solapamiento espectral entre la emisión de BC2:PS y la absorción de PS:PFN. Para la emisión y el decaimiento de fluorescencia, la excitación se estableció en 300 nm.

CONCLUSIONES

Se fabricaron y evaluaron OLEDs azules completamente procesados en solución bajo condiciones atmosféricas, cuya emisión luminosa se basa en un proceso de transferencia de energía tipo FRET

entre BC2 (donador) y PFN (aceptor), evitando la necesidad de emplear cátodos depositados por evaporación térmica. El dispositivo tricapa con una capa de PFN de 25 nm alcanzó una luminancia máxima de 1148 cd/m^2 y una eficiencia cuántica externa (EQE) de 1.27 %. No obstante, la emisión electroluminiscente presentó una componente cian (coordenadas CIE de 0.179, 0.311), atribuida a la formación de excímeros fluoreno–fluoreno. Para minimizar este efecto, se implementó una estrategia anfitrión–huésped utilizando mezclas BC2:PFN (2.5–10 % p/p) como capa emisora. Esta aproximación redujo la formación de excímeros, mejorando simultáneamente la pureza de color y el desempeño de los dispositivos. Como resultado, se obtuvieron OLEDs con emisión azul profunda y coordenadas CIEy inferiores a 0.1. El mejor desempeño correspondió al OLED **8**, basado en BC2:PFN (10 % p/p), que alcanzó una luminancia máxima de 1087 cd/m^2, una eficiencia de corriente de 11.8 cd/A y una EQE máxima de 1.85 %. Además, los estudios de FRET mostraron una mayor eficiencia de transferencia de energía en los dispositivos bicapas respecto a los tricapas, debido a la menor distancia entre las moléculas donadoras y aceptoras.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J.H. Lee, C.H. Chen, P.H. Lee, H.Y. Lin, M.K. Leung, T.L. Chiu, C.F. Lin, Blue organic light-emitting diodes: Current status, challenges, and future outlook, J Mater Chem C 7 (2019) 5874–5888. https://doi.org/10.1039/c9tc00204a.

[2] J. Devesing Girase, S. Rani Nayak, J. Tagare, Shahnawaz, M. Ram Nagar, J.-H. Jou, S. Vaidyanathan, Solution-processed deep-blue (y~0.06) fluorophores based on triphenylamine-imidazole (donor-acceptor) for OLEDs: computational and experimental exploration, J Inf Disp 23 (2022) 53–67. https://doi.org/10.1080/15980316.2021.1959429.

[3] S. Sudheendran Swayamprabha, D.K. Dubey, Shahnawaz, R.A.K. Yadav, M.R. Nagar, A. Sharma, F.C. Tung, J.H. Jou, Approaches for Long Lifetime Organic Light Emitting Diodes, Adv Sci 8 (2021) 2002254. https://doi.org/10.1002/advs.202002254.

[4] S. Izawa, M. Morimoto, K. Fujimoto, K. Banno, Y. Majima, M. Takahashi, S. Naka, M. Hiramoto, Blue organic light-emitting diode with a turn-on voltage of 1.47 V, Nat Commun 14 (2023) 5494. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41208-7.

[5] Y. Im, S.Y. Byun, J.H. Kim, D.R. Lee, C.S. Oh, K.S. Yook, J.Y. Lee, Recent Progress in High‐Efficiency Blue‐Light‐Emitting Materials for Organic Light‐Emitting Diodes, Adv Funct Mater 27 (2017). https://doi.org/10.1002/adfm.201603007.

[6] E. Tankelevičiūtė, I.D.W. Samuel, E. Zysman-Colman, The Blue Problem: OLED Stability and Degradation Mechanisms, J Phys Chem Letters 15 (2024) 1034–1047. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.3c03317.

[7] C.-T. Chen, Evolution of Red Organic Light-Emitting Diodes: Materials and Devices, Chem Mater 16 (2004) 4389–4400. https://doi.org/10.1021/cm049679m.

[8] Q. Wei, N. Fei, A. Islam, T. Lei, L. Hong, R. Peng, X. Fan, L. Chen, P. Gao, Z. Ge, Small-Molecule Emitters with High Quantum Efficiency: Mechanisms, Structures, and Applications in OLED Devices, Adv Opt Mater 6 (2018) 1800512. https://doi.org/10.1002/adom.201800512.

[9] L. Zhu, H. Zhang, X. Peng, M. Zhang, F. Zhou, S. Chen, J. Song, J. Qu, W.-Y. Wong, Blue OLEDs with narrow bandwidth using CF3 substituted bis((carbazol-9-yl)phenyl)amines as emitters: Structural regulation of linker between donor and acceptor in chromophores, Dyes Pigm 194 (2021) 109627. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109627.

[10] G. Meng, D. Zhang, J. Wei, Y. Zhang, T. Huang, Z. Liu, C. Yin, X. Hong, X. Wang, X. Zeng, D. Yang, D. Ma, G. Li, L. Duan, Highly efficient and stable deep-blue OLEDs based on narrowband emitters featuring an orthogonal spiro-configured indolo[3,2,1- de]acridine structure, Chem Sci 13 (2022) 5622–5630. https://doi.org/10.1039/D2SC01543A.

[11] W. Ren, K. Rock Son, T. Geun Kim, Performance improvement of blue TADF top-emission OLEDs by tuning hole injection barriers using a nickel-doped silicon dioxide buffer layer, Appl Surf Sci 612 (2023) 155948. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155948.

[12] H. Lee, D. Karthik, R. Lampande, J.H. Ryu, J.H. Kwon, Recent Advancement in Boron-Based Efficient and Pure Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Materials for Organic Light-Emitting Diodes, Front Chem 8 (2020). https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00373.

[13] Z. Zhang, Z. Zhang, H. Zhang, Y. Wang, 2-(2-Hydroxyphenyl)imidazole-based four-coordinate organoboron compounds with efficient deep blue photoluminescence and electroluminescence, Dalton Trans 47 (2018) 127–134. https://doi.org/10.1039/c7dt03702c.
[14] D. Li, H. Zhang, C. Wang, S. Huang, J. Guo, Y. Wang, Construction of full-color-tunable and strongly emissive materials by functionalizing a boron-chelate four-ring-fused π-conjugated core, J Mater Chem 22 (2012) 4319–4328. https://doi.org/10.1039/c1jm14606h.
[15] A. Alvarez-Quesada, J.E. Báez, J.O.C. Jiménez-Halla, G. Ramos-Ortiz, G. González-García, Difluoroboron Complexes Based on Benzimidazole–Phenolates as Blue Emitters, Inorg Chem 63 (2024) 6649–6659. https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.3c04504.
[16] S. Wang, H. Zhang, B. Zhang, Z. Xie, W.-Y. Wong, Towards high-power-efficiency solution-processed OLEDs: Material and device perspectives, Materials Science and Engineering: R: Reports 140 (2020) 100547. https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100547.
[17] J.Y. Woo, M.H. Park, S.H. Jeong, Y.H. Kim, B. Kim, T.W. Lee, T.H. Han, Advances in Solution-Processed OLEDs and their Prospects for Use in Displays, Adv Mater 35 (2023) 2207454. https://doi.org/10.1002/adma.202207454.
[18] C. Basilio, J. Oliva, T. Lopez-Luke, Y.-C. Pu, J.Z. Zhang, C.E. Rodriguez, E. de la Rosa, Luminance enhancement in quantum dot light-emitting diodes fabricated with Field's metal as the cathode, J Phys D Appl Phys 50 (2017) 095106. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5604.
[19] E. Pérez-Gutiérrez, M. Cerón, P. Santos, P. Ceballos, P. Venkatesan, S. Thamotharan, W. Bernal-Pinilla, O. Barbosa-García, M.J. Percino, Film morphology of acrylonitrile materials deposited by a solution process and vacuum evaporation. Supramolecular interactions, optoelectronic properties and an approximation by computational calculations, New J Chem 43 (2019) 15513–15524. https://doi.org/10.1039/C9NJ03063H.
[20] J. Kang, J. Jo, Y. Jo, S.Y. Lee, P.E. Keivanidis, G. Wegner, D.Y. Yoon, Time-resolved photoluminescence study of low-energy emission mechanisms in oligofluorene and polyfluorene films, Polymer 49 (2008) 5700–5704. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.10.006.
[21] K.A. Luck, H.N. Arnold, T.A. Shastry, T.J. Marks, M.C. Hersam, Suppression of Polyfluorene Photo-Oxidative Degradation via Encapsulation of Single-Walled Carbon Nanotubes, J Phys Chem Lett 7 (2016) 4223–4229. https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.6b02079.
[22] M. Shukla, N. Brahme, R.S. Kher, S.K. Khokhar, Elementary approach to calculate quantum efficiency of polymer light emitting diodes, Indian J Pure Appl Phys 49 (2011) 142–145.
[23] Z. Zhang, Z. Zhang, K. Ye, J. Zhang, H. Zhang, Y. Wang, Diboron complexes with bis-spiro structures as high-performance blue emitters for OLEDs, Dalton Trans 44 (2015) 14436–14443. https://doi.org/10.1039/c5dt02093j.
[24] Z. Zhang, H. Zhang, C. Jiao, K. Ye, H. Zhang, J. Zhang, Y. Wang, 2-(2-Hydroxyphenyl)Benzimidazole-Based Four-Coordinate Boron-Containing Materials With Highly Efficient Deep-Blue Photoluminescence and Electroluminescence, Inorg Chem 54 (2015) 2652–2659. https://doi.org/10.1021/ic502815q.
[25] C.A.M. Salla, J. Teixeira dos Santos, G. Farias, A.J. Bortoluzi, S.F. Curcio, T. Cazati, R. Izsák, F. Neese, B. de Souza, I.H. Bechtold, New Boron(III) Blue Emitters for All-Solution Processed OLEDs: Molecular Design Assisted by Theoretical Modeling, Eur J Inorg Chem 2019 (2019) 2247–2257. https://doi.org/10.1002/ejic.201900265.
[26] J. Yang, L. Xie, Y.-Q.-Q. Yi, X. Chen, C. Wei, Y. Guo, Y. Liu, B. Qian, W. Su, Z. Cui, Cross-linkable deep-blue small molecular material for solution-processed organic light-emitting diodes, Opt Mater 114 (2021) 110945. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110945.
[27] H. Ha, J. Cho, J.Y. Lee, B. Yun, J. Lee, M.C. Suh, Non-symmetric 9,10-Di(2-naphthyl)anthracene derivatives as hosts and emitters for solution-processed blue fluorescent organic light emitting diodes, J Ind Eng Chem 87 (2020) 90–99. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.03.016.
[28] J. Peng, X. Xu, X.J. Feng, L. Li, Fabrication of solution-processed pure blue fluorescent OLED using exciplex host, J Lumin 198 (2018) 19–23. https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.02.010.
[29] P. Therdkatanyuphong, C. Kaiyasuan, P. Chasing, T. Kaewpuang, T. Chawanpunyawat, P. Wongkaew, T. Sudyoadsuk, V. Promarak, Highly efficient all solution-processed non-doped deep-blue electroluminescent devices from oligocarbazole-end-capped spirobifluorenes, Mater Chem Front 4 (2020) 2943–2953. https://doi.org/10.1039/D0QM00531B.
[30] Y. Takita, K. Takeda, N. Hashimoto, S. Nomura, T. Suzuki, H. Nakashima, S. Uesaka, S. Seo, S. Yamazaki, Highly efficient deep‐blue fluorescent dopant for achieving low‐power OLED

display satisfying BT.2020 chromaticity, J Soc Inf Disp 26 (2018) 55 – 63. https://doi.org/10.1002/jsid.634.
[31] C. Berney, G. Danuser, FRET or No FRET: A Quantitative Comparison, Biophys J 84 (2003) 3992–4010. https://doi.org/10.1016/S0006-3495(03)75126-1.
[32] S. Hong, A.A.S. Samson, J.M. Song, Application of fluorescence resonance energy transfer to bioprinting, TrAC Trends Anal Chem 122 (2020) 115749. https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115749.

TRANSICIÓN ESTABLE-INTERMITENTE EN UN LÁSER F8 DE TULIO CON PI-NOLM EN RÉGIMEN MODE-LOCKED CON MODULACIÓN Q-SWITCHED

Luis Alberto Rodríguez Morales[1], Olivier Pottiez[1], Diego Hernández Ruiz[2], Héctor Santiago Hernández[2], Luis Martín González Vidal[1]

[1] Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., León, Guanajuato, México.
[2] Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.
beto7500@hotmail.com

RESUMEN

Se analiza la transición entre operación Q-switched mode-locked (QS-ML) regular e intermitente en un láser de fibra figura-ocho (F8) dopado con tulio, basado en un espejo de lazo óptico no lineal con desbalance de polarización (PI-NOLM). La cavidad opera sin polarizador intracavidad, por lo que el estado de polarización que incide en el PI-NOLM puede evolucionar libremente y modificar la pérdida no lineal efectiva. Se estudian tres condiciones de bombeo cercanas, 930, 920 y 900 mW, manteniendo fijos los controladores de polarización. A 930 mW se observa un régimen QS-ML altamente regular; al reducir el bombeo en aproximadamente 1-3 %, aparecen fluctuaciones de amplitud, pérdida de periodicidad y episodios en los que el mode locking se atenúa o desaparece temporalmente. Los espectros promedio permanecen relativamente semejantes, de modo que la transición se manifiesta principalmente en el dominio temporal. El análisis mediante mapas round-trip, energía, intensidad pico, anchura RMS y centro temporal muestra que la inestabilidad surge del acoplamiento entre dinámica de ganancia, pérdida no lineal dependiente de polarización y efectos de tipo solitónico. Estos resultados muestran que pequeñas variaciones de operación pueden reorganizar la dinámica de un láser F8-Tm con PI-NOLM.

Palabras clave: láser de fibra dopada con tulio; figura-ocho; PI-NOLM; Q-switched mode locking; dinámica no lineal; estabilidad temporal.

INTRODUCCIÓN

Los láseres de fibra dopada con tulio que emiten alrededor de 2 micras son fuentes relevantes para sensado, espectroscopia, procesamiento de materiales y aplicaciones biomédicas, debido a su rango espectral y a la disponibilidad de componentes de fibra en esa región [1,2]. Además de la operación continua, estos sistemas pueden presentar mode locking, Q-switching y regímenes híbridos QS-ML, en los cuales una envolvente lenta de tipo Q-switched modula trenes de pulsos rápidos asociados con el mode locking [3,4].

Desde el punto de vista de dinámica no lineal, los láseres pasivamente mode-locked son sistemas disipativos donde interactúan dispersión, no linealidad Kerr, ganancia saturable y pérdidas dependientes de intensidad [5]. Esta combinación puede producir pulsos tipo solitón, pulsos tipo ruido, explosiones de solitones, y transiciones abruptas entre estados dinámicos [5,6]. Por ello, además de construir fuentes pulsadas, estas cavidades funcionan como plataformas experimentales para estudiar estabilidad y bifurcaciones en sistemas fotónicos.

La arquitectura figura-ocho es especialmente útil porque permite incorporar un nonlinear optical loop mirror (NOLM) o una variante dependiente de polarización, conocida como PI-NOLM, como elemento de conmutación no lineal [7-9]. En un PI-NOLM, la transmisión depende de la potencia y del estado de polarización, de manera que puede actuar como absorbedor saturable artificial cuando la transmisión aumenta con la intensidad [8,9]. Sin embargo, esa misma dependencia de polarización implica que, si no se fija el estado de polarización de entrada, la pérdida no lineal efectiva puede variar durante la operación del láser [10,11].

En este trabajo se presenta un estudio experimental de una cavidad F8 de tulio con PI-NOLM operando sin polarizador intracavidad. Además de que se muestra una dinámica QS-ML [12], se

analiza cómo una reducción pequeña de la potencia de bombeo puede llevar al sistema desde un régimen estable hacia una dinámica intermitente. Para ello se comparan trazas temporales, espectros promedio, mapas round-trip y métricas de evolución de los paquetes pulsados.

ARREGLO EXPERIMENTAL

La cavidad experimental se implementó en arquitectura figura-ocho. El lazo principal, que constituye la cavidad de resonancia (lado izquierdo del esquema de la Fig. 1) contiene la fibra dopada con tulio, el WDM de bombeo, un acoplador de salida 90/10. El bombeo se realizó mediante una fuente de onda continua en 1550 nm que excita un segmento de fibra dopada con tulio. La cavidad tiene una longitud total aproximada de 52.5 m, correspondiente a un periodo de round-trip de 262 ns y a una frecuencia fundamental de 3.81 MHz. El anillo incluye un aislador óptico independiente de polarización (PI-ISO), como se indica en la Figura 1, para favorecer la operación unidireccional de la cavidad.

El PI-NOLM se construyó con un acoplador 50/50 y 30 m de fibra SM-2000 torcida a una razón de siete vueltas por metro. La torsión favorece una respuesta de birrefringencia circular que ayuda a preservar la elipticidad de la polarización a lo largo del lazo [9]. Un controlador de polarización se colocó de forma asimétrica dentro del PI-NOLM para producir el desbalance de polarización necesario.

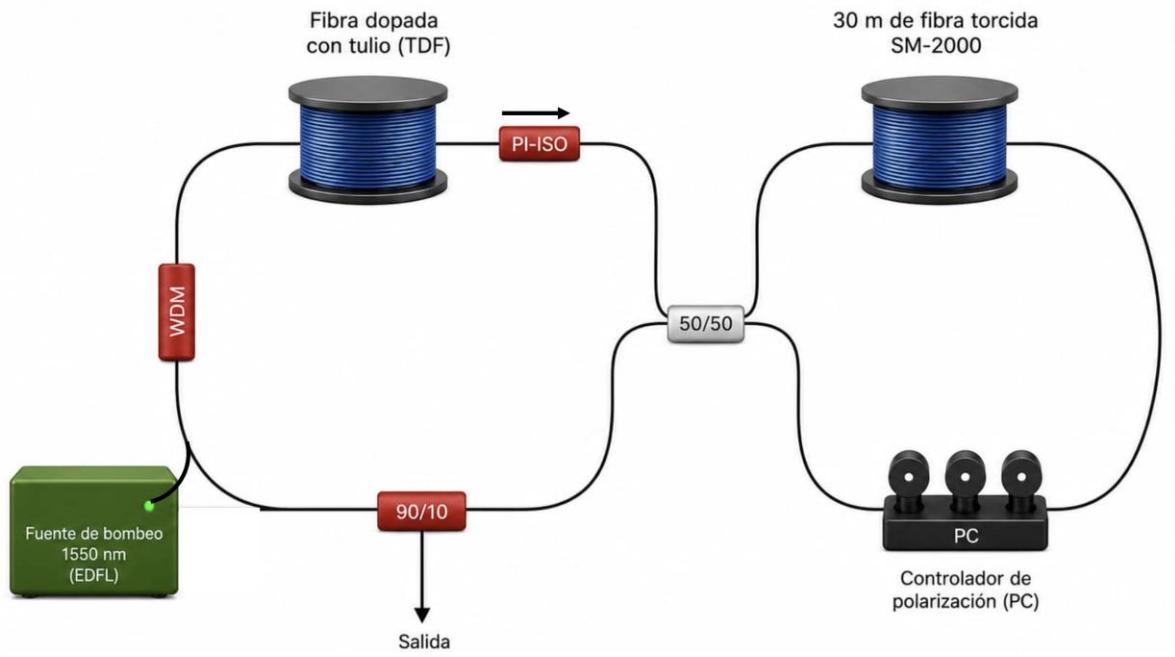


Figura 1. Esquema experimental de la cavidad F8 de tulio con PI-NOLM.

El procedimiento experimental consistió en ajustar los controladores de polarización a alta potencia de bombeo para obtener un régimen QS-ML regular. Posteriormente se mantuvieron fijos esos ajustes y se redujo el bombeo a 930, 920 y 900 mW. La caracterización espectral se realizó con un analizador de espectros ópticos Yokogawa AQ6375. Las señales temporales se registraron con un fotodetector Newport 818-BB-51F de 10 GHz conectado a un osciloscopio Tektronix DPO71604C de 16 GHz y 50 GS/s. Las ventanas temporales de 400 µs permitieron observar simultáneamente la modulación QS lenta y la organización de los pulsos mode-locked dentro de cada envolvente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis se enfocó en cuatro indicadores experimentales: la forma de las envolventes QS, la estructura round-trip del paquete mode-locked, la evolución de energía/intensidad y las trayectorias de anchura RMS y centro temporal. La profundidad de modulación Q-switched se usa aquí como una medida práctica del contraste de la envolvente; valores más altos indican una modulación más profunda y, en el límite, episodios de supresión temporal del tren mode-locked. La anchura RMS y el centro temporal se emplean como métricas de seguimiento del paquete pulsado, adecuadas para formas temporales complejas [13].

La Figura 2 muestra la respuesta del láser para las tres potencias de bombeo. A 930 mW, las envolventes QS son periódicas, casi simétricas y de amplitud semejante. A 920 mW, la periodicidad general aún se conserva, pero aparecen fluctuaciones más claras de amplitud y forma. A 900 mW, el régimen se vuelve intermitente: algunas envolventes se atenúan de manera profunda y la separación entre eventos deja de ser regular.

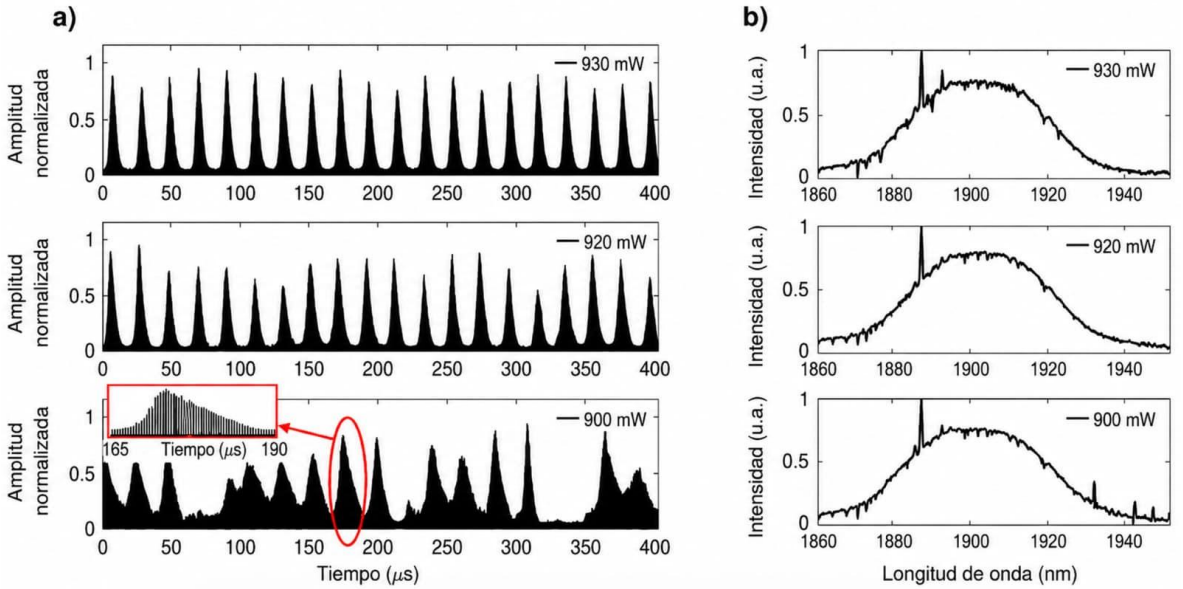


Figura 2. (a) Trazas temporales de 400 μs para potencias de bombeo de 930, 920 y 900 mW. (b) Espectros ópticos promedio correspondientes a las mismas condiciones de bombeo.

El contraste con la evolución de los espectros promedio es importante. Aunque el dominio temporal muestra una transición clara entre régimen estable, transición e intermitencia, los espectros registrados con OSA se mantienen relativamente semejantes. Esto indica que una medición espectral promedio puede ocultar cambios dinámicos significativos, especialmente cuando la adquisición integra más de 10^5 pulsos. En la traza temporal de 900 mW, el recuadro permite distinguir la estructura mode-locked dentro de una envolvente QS. Por tanto, la estabilidad del QS-ML no puede evaluarse sólo a partir del espectro promedio.

La lectura física es que la reducción de bombeo no destruye de inmediato la capacidad de la cavidad para producir pulsos, pero sí altera el balance entre ganancia y pérdida no lineal. En el régimen estable, la ganancia y la transmisión efectiva del PI-NOLM parecen repetirse de un ciclo QS al siguiente. En el régimen intermitente, pequeñas variaciones de polarización pueden modificar el umbral de conmutación, debilitando temporalmente la acción de absorbedor saturable.

Los mapas temporales round-trip, es decir, por vueltas de cavidad, permiten observar la evolución del paquete mode-locked dentro de cada envolvente QS. En la Figura 3, cada panel se obtuvo al segmentar la traza temporal con el periodo de cavidad y apilar aproximadamente 1500 roundtrips consecutivos. Este procedimiento separa el tiempo rápido, asociado con la estructura del pulso

dentro de una vuelta de cavidad, del tiempo lento, asociado con la evolución a escala de muchas vueltas.

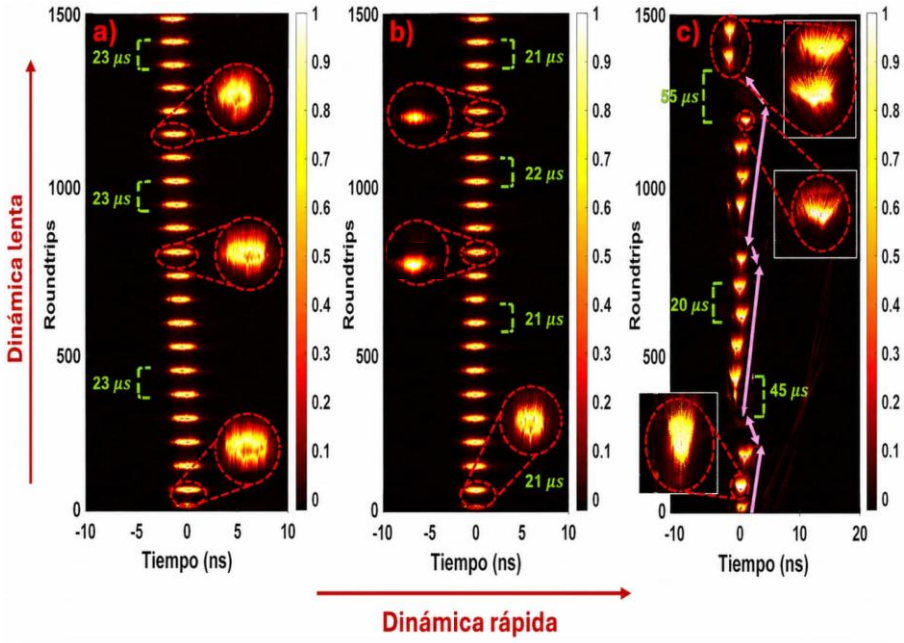


Figura 3. Mapas temporales round-trip para potencias de bombeo de (a) 930 mW, (b) 920 mW y (c) 900 mW.

En la Figura 3, la escala de color representa la intensidad normalizada. Las marcas verdes indican separaciones temporales entre envolventes QS, mientras que las flechas señalan la deriva temporal acumulativa del paquete. A 930 mW, las estructuras son compactas y se repiten con separación casi constante. Esta regularidad es compatible con un QS-ML gobernado principalmente por dinámica de ganancia [12]. A 920 mW, el paquete conserva una trayectoria reconocible, pero aumentan las variaciones de amplitud, ancho y posición. A 900 mW, la evolución se organiza en grupos de pocas envolventes separados por intervalos de baja energía. La trayectoria adquiere una forma tipo diente de sierra, lo que sugiere una modulación más lenta superpuesta al ciclo QS.

Este cambio no es una simple reducción de amplitud. La aparición de estructuras laterales, fragmentación del paquete y desplazamientos acumulativos indica que el mecanismo de formación de pulsos cambia. En particular, la pérdida no lineal del PI-NOLM deja de ser suficientemente reproducible de un ciclo a otro y la dinámica se vuelve sensible a fluctuaciones de polarización.

La Figura 4 muestra la evolución de energía normalizada e intensidad pico extraídas de los mapas de la Figura 3. En esta figura, la energía normalizada se muestra en negro y la intensidad pico normalizada en rojo; para 900 mW, la línea negra discontinua indica la modulación lenta adicional observada en el régimen intermitente. A 930 mW, ambas magnitudes oscilan de forma casi periódica y permanecen dentro de un intervalo acotado. Esto corresponde a una QS-ML moderada y repetible, con ciclos regulares de acumulación y liberación de energía.

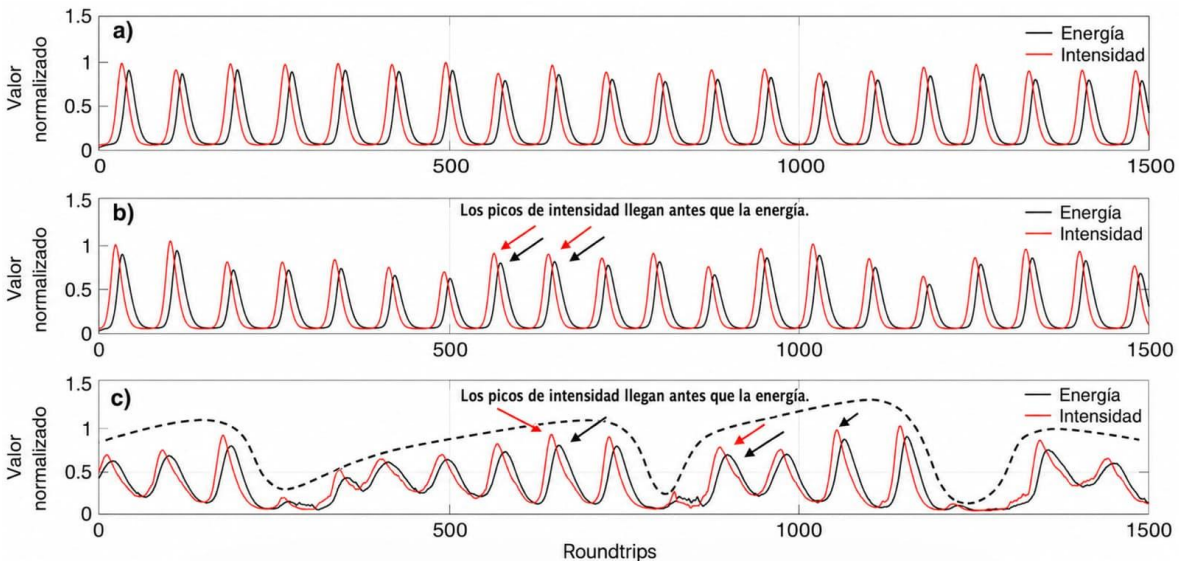


Figura 4. Evolución round-trip de la energía normalizada y de la intensidad pico normalizada para potencias de bombeo de (a) 930 mW, (b) 920 mW y (c) 900 mW.

A 920 mW, la intensidad y la energía ya no alcanzan máximos perfectamente sincronizados: la intensidad tiende a adelantar a la energía por aproximadamente una vuelta de cavidad. A 900 mW, la diferencia es mayor y aparecen grupos de 4 a 6 envolventes con amplitud creciente, seguidos de caídas abruptas. En términos de QS-ML, esto corresponde a una modulación muy profunda, cercana a episodios de supresión del mode locking.

El hecho de que la intensidad máxima pueda alcanzarse antes que la energía máxima indica que la compresión inicial del paquete es rápida y ocurre antes de que se libere toda la energía de la ganancia. Esta firma es relevante porque sugiere que, en el régimen intermitente, la formación de pulsos no depende únicamente de la acción regular del PI-NOLM como absorbedor saturable, sino también de efectos de compresión y ruptura asociados con la dinámica solitónica en dispersión anómala [5,6].

La Figura 5 muestra la evolución round-trip de la anchura RMS y del centro temporal del paquete. En esta figura, las curvas negra, roja y naranja corresponden a 930, 920 y 900 mW, respectivamente. Para 930 mW, ambas variables presentan trayectorias regulares dentro de cada envolvente. La anchura (Fig. 5a) primero disminuye, alcanza un mínimo cerca del máximo de energía y después vuelve a aumentar. Este comportamiento es consistente con una función de transmisión estable del PI-NOLM, produciendo una variación de duración del pulso repetible entre las diferentes envolventes QS, inversa de la variación de energía en la región de los máximos [14]. Finalmente, el centro temporal (Fig. 5b) para 930 mW igualmente presenta trayectorias en “U” similares dentro de cada envolvente (sólo presentan un desplazamiento acumulativo lineal hacia tiempos más cortos, línea punteada negra, que es un artefacto relacionado con la construcción de los mapas). Estas trayectorias en “U” se deben a cambios de velocidad de grupo del paquete en la cavidad dispersiva, a su vez causados por pequeños desplazamientos espectrales asociados a los ciclos de saturación y recuperación de la ganancia [12]. Esta repetibilidad demuestra la regularidad casi-periódica de la dinámica de ganancia que gobierna el régimen QS-ML para este nivel de bombeo. En resumen, las evoluciones de la anchura RMS y posición temporal para 930 mW en la Figura 5 confirman que este régimen regular resulta de un balance entre una dinámica de ganancia casi-periódica y una característica de transmisión del PI-NOLM (y por lo tanto, un estado de polarización) estable.

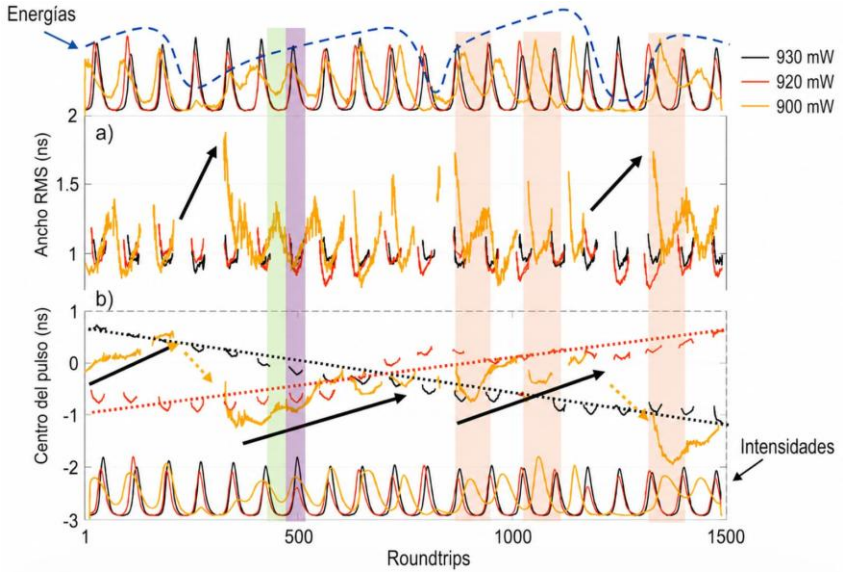


Figura 5. Evolución round-trip de (a) la anchura RMS del paquete pulsado y (b) el centro temporal del paquete pulsado para las tres condiciones de bombeo.

A 920 mW, las evoluciones mostradas en la Figura 5 en general mantienen su regularidad, aunque se nota una mayor variabilidad comparado con el caso anterior. Finalmente, a 900 mW, la anchura RMS adquiere una evolución más asimétrica, con compresión abrupta seguida de ensanchamiento gradual en cada envolvente (ver regiones anaranjadas). Esta forma difiere del patrón suave y simétrico observado a mayor bombeo y es compatible con una contribución solitónica transitoria. El centro temporal también muestra desplazamientos acumulativos hacia tiempos más largos (flechas negras en Fig. 5b), seguidos de reinicios hacia tiempos más cortos durante intervalos de baja energía (flechas amarillas punteadas). Esta evolución reproduce el patrón tipo diente de sierra observado en el mapa (Fig. 3c).

En conjunto, las últimas 4 figuras muestran que la transición estable-intermitente al reducir el bombeo es mucho mas compleja que una simple disminución de potencia. La cavidad responde a reducciones pequeñas de bombeo mediante una reorganización multiescala: el ciclo QS se mantiene parcialmente, pero queda perturbado por variaciones de pérdidas no lineales dependientes de polarización y por mecanismos de compresión relacionados con solitones. Por ello, fijar el estado de polarización a la entrada del PI-NOLM aparece como una estrategia directa para ampliar la ventana de estabilidad, aunque la operación libre de polarización permite observar dinámicas más elaboradas, cuyo análisis posiblemente permitirá evidenciar fenómenos novedosos, como un auto-ajuste del estado de polarización en la cavidad a alta potencia, llevando a regímenes de operación más eficientes de la fuente y a la generación de pulsos con propiedades mejoradas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó experimentalmente la transición entre un régimen QS-ML regular y un régimen intermitente en un láser F8 de tulio con PI-NOLM operando sin polarizador intracavidad. Con los controladores de polarización fijos, una reducción del bombeo de 930 a 920 y 900 mW fue suficiente para modificar de forma significativa la dinámica temporal del sistema. A 930 mW, la cavidad presentó envolventes QS casi periódicas, con amplitud y separación relativamente uniformes. Al disminuir el bombeo, aparecieron fluctuaciones de amplitud, pérdida de regularidad entre envolventes y episodios de baja energía en los que la formación del paquete mode-locked se debilitó de manera temporal.

La comparación entre trazas temporales y espectros promedio muestra que la transición no queda reflejada adecuadamente en la respuesta espectral media. Aunque los espectros registrados para

las tres condiciones de bombeo conservan una forma semejante, los mapas round-trip revelan cambios importantes en la organización temporal del paquete pulsado. En particular, el régimen intermitente presenta estructuras menos reproducibles, deriva temporal acumulativa y secuencias de envolventes separadas por intervalos de baja intensidad.

El seguimiento de la energía, la intensidad pico, la anchura RMS y el centro temporal indica que la transición no corresponde únicamente a una reducción de potencia intracavitaria. Los resultados son consistentes con una modificación del balance entre los ciclos de saturación/recuperación de ganancia, transmisión no lineal del PI-NOLM y evolución del estado de polarización. En el régimen de 900 mW, la compresión abrupta del paquete y el posterior ensanchamiento gradual sugieren además la participación transitoria de mecanismos solitónicos, favorecidos por la dispersión anómala de la cavidad.

Estos resultados muestran que la estabilidad del QS-ML en cavidades F8 basadas en PI-NOLM depende críticamente de la reproducibilidad de la pérdida no lineal efectiva. En ausencia de un polarizador que fije el estado de polarización de entrada al PI-NOLM, pequeñas variaciones de bombeo pueden desplazar la cavidad desde una dinámica gobernada principalmente por ganancia hacia un régimen multiescala donde intervienen polarización, pérdida no lineal y compresión solitónica. Por tanto, el control del estado de polarización constituye un parámetro relevante para ampliar la ventana de operación estable en láseres F8 de tulio alrededor de 2 μm. Sin embargo, estos resultados también apuntan hacia la posible existencia en la cavidad, para potencias altas, de un mecanismo de auto-ajuste de polarización, cuya acción podría sustituir la operación de un polarizador físico, mejorando la eficiencia de la fuente y las propiedades de los pulsos generados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por SECIHTI a través del programa Ciencia Básica y de Frontera, proyecto CBF2023-2024-612. También se reconoce el apoyo de SECIHTI mediante la beca posdoctoral 2482407 otorgada a Luis Alberto Rodríguez Morales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] L. A. Rodríguez-Morales et al., “Impact of polarization control on the stability of a Thulium-Doped Figure-8 fiber laser,” Optics & Laser Technology, Vol. 192, 2025, 113770. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113770

[2] L. A. Rodríguez-Morales et al., “Study of complex instability in a Thulium-doped figure-eight fiber laser including a polarization-imbalanced NOLM with no polarization control,” Optik, Vol. 318, 2024, 172100. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.172100

[3] M. Durán-Sánchez et al., “Passively Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation technique,” Ceramics International, Vol. 49, 2023, pp. 41230-41237. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.056

[4] R. López-Estopier et al., “Q-switched mode locking noise-like pulse generation from a thulium-doped all-fiber laser based on nonlinear polarization rotation,” Results in Optics, Vol. 5, 2021, 100115. https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100115

[5] P. Grelu y N. Akhmediev, “Dissipative solitons for mode-locked lasers,” Nature Photonics, Vol. 6, 2012, pp. 84-92. https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.345

[6] A. F. Runge, N. G. Broderick y M. Erkintalo, “Observation of soliton explosions in a passively mode-locked fiber laser,” Optica, Vol. 2, 2015, pp. 36-39. https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000036

[7] N. J. Doran y D. Wood, “Nonlinear optical loop mirror,” Optics Letters, Vol. 13, 1988, pp. 56-58. https://doi.org/10.1364/OL.13.000056

[8] E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla, D. E. García-Gómez y J. W. Haus, “Fiber laser mode locked by a Sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation,” Optics Letters, Vol. 26, 2001, pp. 1559-1561. https://doi.org/10.1364/OL.26.001559

[9] E. A. Kuzin, N. Korneev, J. W. Haus y B. Ibarra-Escamilla, “Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birefringence fiber,” Journal of the Optical Society of America B, Vol. 18, 2001, pp. 919-925. https://doi.org/10.1364/JOSAB.18.000919

[10] O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla y F. Méndez-Martínez, “Theoretical investigation of the NOLM with highly twisted fibre and a lambda/4 birefringence bias,” Optics Communications, Vol. 254, 2005, pp. 152-167. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.05.015

[11] O. Pottiez, R. Grajales-Coutiño, B. Ibarra-Escamilla, E. A. Kuzin y J. C. Hernández-García, “Adjustable noiselike pulses from a figure-eight fiber laser,” Applied Optics, Vol. 50, 2011, pp. E24-E31. https://doi.org/10.1364/AO.50.000E24

[12] O. Pottiez et al., “Gain-driven spectral-temporal noise-like pulse dynamics in a passively mode-locked fiber laser,” Optics Express, Vol. 27, 2019, pp. 34742-34759. https://doi.org/10.1364/OE.27.034742

[13] J. A. Buck, Fundamentals of Optical Fibers, John Wiley & Sons, 2004.

[14] E. P. Ippen (1994), Principles of passive mode locking. *Applied Physics B 58*, 159-170. https://doi.org/10.1007/BF01081309

METODOLOGÍA 4MAT PARA EL DISEÑO DE SECUENCIAS DE APRENDIZAJE ADAPTATIVO PARA UN CURSO DE FÍSICA INTRODUCTORIA

Liliana Vázquez Mercado[1], José Luis Santana Fajardo[1], Mario Humberto Ramírez Díaz[2]

[1] Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara; [2] Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaria, del Instituto Politécnico Nacional (IPN).
liliana.vmercado@academicos.udg.mx

RESUMEN

El aprendizaje de conceptos de física en los primeros semestres de la Universidad para carreras de ingeniería y afines pone de relieve las dificultades conceptuales que áreas como la mecánica clásica, la termodinámica y el electromagnetismo plantean a los estudiantes. Se diseñaron cuatro secuencias didácticas basadas en la metodología 4MAT que abordan los temas siguientes: tres leyes de Newton, campo eléctrico, campo magnético, calor, temperatura y ondas. Los temas fueron identificados por el profesorado del Departamento de Física como aquellos indispensables en la formación de cualquier estudiante de ingenierías o áreas afines. Dichas secuencias se implementaron en el aula y constituyen un ciclo que comprende: motivación del tema, explicación formal, experimentación y discusión de posibles aplicaciones. Posterior al desarrollo de cada tema mediante el ciclo 4MAT, se aplicó un cuestionario con 6 preguntas de opción múltiple que permite recabar las ideas principales de cada concepto y se tendrán entonces dos grupos de trabajo: estudiantes que hayan obtenido más del 70% de aciertos y estudiantes que hayan obtenido menos del 70 % de aciertos. Para los primeros, se diseñó una actividad más retadora, mientras que para los segundos se diseñaron secuencias basadas en simulaciones PhET. Se encontró que, tanto el ciclo de aprendizaje como la adaptación de actividades en base a los conocimientos previos de los estudiantes, favorecen la ganancia conceptual así como el cambio en las actitudes de los estudiantes hacia la física. Se emplearon instrumentos estandarizados a manera de cuestionarios pre instrucción y post instrucción para medir la ganancia conceptual mediante el factor de Dellwo, así como el cambio de actitudes que genera una instrucción basada en el Sistema 4MAT hacia áreas del conocimiento pertenecientes a la física. El resultado indica un aumento en la ganancia conceptual y una tendencia favorable hacia la física.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la labor educativa en la universidad está marcada por un modelo educativo enfocado en el desarrollo de competencias en el estudiantado (Castellanos, Verduzco, Moreno, Padilla y Pérez, 2007). Hoy día se ha extendido el uso de herramientas tecnológicas para transmitir información e incursionar de forma irreversible en los procesos de enseñanza-aprendizaje: "*las nuevas tecnologías están cambiando significativamente la forma de enseñar; (...) es necesario proponer y replantear objetivos, contenidos y metodologías*" (Olmedo y Farrerons, 2017, p. 42).

Precisamente es, mediante el uso de plataformas virtuales, que podemos acercar el conocimiento a la población estudiantil, a través del diseño e implementación de un curso con características adaptativas ofertado para estudiantes universitarios de carreras de ingenierías y ciencias exactas, que aborde la unidad de aprendizaje de Física Introductoria. Ahora, un curso adaptativo tendrá características particulares que lo distinguen de un curso tradicional, a saber, que el estudiantado será quien marque el ritmo de avance en función de sus necesidades de aprendizaje.

El aprendizaje adaptativo se define como una estrategia educativa que utiliza Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) como herramientas para la enseñanza interactiva. Consiste en personalizar el aprendizaje, esto es, que los alumnos aprendan a su propio ritmo y en función de sus necesidades tanto cognitivas como formativas. El punto de partida es el cuerpo de

conocimientos que el alumno ya posee y el propósito es llevarlo a niveles superiores o a niveles básicos, según corresponda (Hernández, 2021).

De manera que, para atender la diversidad de perfiles estudiantiles que llegan a las aulas, propondremos algunas estrategias de aprendizaje activo y adaptativo de acuerdo al desempeño en los saberes adquiridos en clase. El curso introductorio de física se impartió durante el ciclo 2026 A a un promedio de 40 estudiantes de distintas carreras universitarias entre las que se encuentran: ingeniería en logística y transporte, licenciatura en física, licenciatura en ciencia de materiales, licenciatura en informática, ingeniería en computación e ingeniería biomédica. El curso se impartió de forma totalmente presencial y se utilizó la plataforma Moodle para albergar todo su contenido. Dicha plataforma es de acceso gratuito para estudiantes y profesores de la Universidad y posee características que lo hacen único, robusto y seguro para crear ambientes de aprendizaje personalizados (Olmos et al., 2015).

TEORÍA

El curso introductorio de física que se imparte a nivel superior en el Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías abarca 13 capítulos que deben revisarse en 17 semanas lectivas. De manera que aplicar una secuencia didáctica como la propuesta en este trabajo no es posible para todos y cada uno de los temas contemplados en el programa.

Un primer paso fue solicitar a los profesores del Departamento de Física seleccionar los conceptos más relevantes y fundacionales que deben cubrirse. Mediante un formulario de Google, Se le pidió a los profesores y las profesoras que evaluaran los conceptos tomados del programa en extenso de la asignatura y usaran una escala que va desde “muy importante”, “importante” y “menos importante”, de acuerdo con su experiencia. Obtuvimos un total de 36 respuestas, de las que fue posible identificar los conceptos siguientes como los más importantes: leyes de Newton, ley de Coulomb, campo eléctrico, campo magnético, temperatura y calor.

Otro punto es considerar los perfiles del estudiantado que tomará el curso, para ello es relevante destacar el uso de instrumentos especializados como el Force Concept Inventory (FCI). El FCI (Hestenes et al., 1992) es un cuestionario que consta de 30 reactivos con 5 respuestas de opción múltiple, entre las que destaca una sola opción correcta y opciones entre las que se introducen ideas de “sentido común” o distractores. Ha sido aplicado desde 1992 y tiene tres propósitos principales: evaluar la instrucción, utilizarse como examen diagnóstico y utilizarse como examen de ubicación. Dada la naturaleza de este cuestionario, que es de opción múltiple con una opción correcta, no sólo es relevante identificar cuántos estudiantes obtienen puntajes altos, sino cuántos estudiantes se equivocan y en qué reactivos lo hacen.

Por otra parte, el Sistema 4MAT (Ramírez, 2010) es un resultado del modelo de Kolb y la integración de la influencia de los hemisferios cerebrales en el aprendizaje y desarrollo. De forma generalizada, el individuo parte de una reflexión que plantea el contexto y por medio de la observación pasa de la experiencia personal a una teoría más abstracta, dicha teoría puede ser evaluada e integrada en la forma de actuar. Para McCarthy, es posible considerar este esquema de forma más interactiva al añadir tendencias y preferencias que pueden caracterizar a un estilo en particular. A continuación, se describe cada uno.

Estilo 1. Aprendizaje imaginativo. Se rigen por el ¿por qué? Observan los detalles y tienen distintas perspectivas para ver las cosas, suelen participar activamente y relacionan lo aprendido con la vida personal, por lo que se enfocan en la innovación e ideas.

Estilo 2. Aprendizaje analítico. Crean conceptos y modelos a través del ¿qué? y conocimientos previos. Se adaptan fácilmente a la metodología de las clases tradicionales porque se enfocan en el orden y exactitud, además de sentir interés por la comprensión de sistemas y resolución de problemas con la lógica.

Estilo 3. Aprendizaje dinámico. Al preguntarse ¿cómo funciona esto?, son capaces de aprender probando teorías y poniendo en práctica sus ideas. Tienen un gusto por las habilidades técnicas y actividades manuales.

Estilo 4. Aprendizaje de sentido común. Suelen actuar y probar experiencia preguntándose ¿qué sucede si...?, recurriendo a la prueba y al error. Les gusta concluir con ideas propias a falta de otra explicación, por lo que es común que estén abiertos a otras alternativas.

De la clasificación previa de estilos de aprendizaje se desprende la secuencia 4MAT que se empleó para diseñar las actividades en las secuencias didácticas presentadas en este trabajo.

PARTE EXPERIMENTAL

La metodología empleada consistió en el diseño de una secuencia de aprendizaje de acuerdo con el sistema 4MAT (Ramírez, 2010) que abordó los conceptos fundacionales del curso en concordancia con lo identificado por los docentes del Departamento de Física. Dichos conceptos son: leyes de Newton, ley de Coulomb, campo eléctrico, campo magnético, calor y temperatura. El abordaje de cada concepto nos tomó un par de sesiones de dos horas cada sesión y el curso se imparte contemplando una carga de cuatro horas semanales, de manera que consideramos una semana para cada concepto.

La aplicación de la secuencia 4MAT para los conceptos consta de cuatro fases: motivación del tema, desarrollo formal mediante clase expositiva, experimentación y extensión de los conocimientos. La motivación o introducción al tema se presentó a los estudiantes con un breve video de la situación física asociada con el concepto en turno. La clase expositiva tiene como finalidad llevar al estudiante al formalismo matemático necesario para la abstracción del concepto físico. Dado el nivel introductorio del curso y la amplitud del programa que se debe abarcar de la Unidad de Aprendizaje, el docente debe enfocarse en la fórmula, su análisis dimensional y mostrar un par de ejemplos o ejercicios ilustrativos que se resuelven paso a paso para mayor claridad.

Para la parte de experimentación, se les pidió a los estudiantes organizarse en equipos para hacer experimentos con materiales muy sencillos que se pudieran manipular en el salón. También tuvimos la oportunidad de hacer algunos de ellos en un laboratorio de enseñanza de la física cuando abordamos los temas de electricidad y magnetismo. Finalmente, para terminar la secuencia contemplada para una clase de 2 horas, se les pidió a los estudiantes que, organizados en los equipos recién formados, respondieran a preguntas sencillas que ilustraran cómo podrían aplicar lo aprendido respecto al concepto físico en turno. Las figuras 1 y 2 ilustran algunas de las secuencias planeadas para temas como la segunda y tercera leyes de Newton, respectivamente.

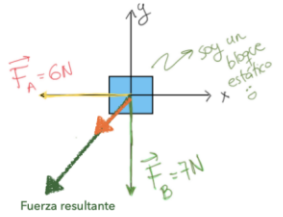
¿POR QUÉ? (MOTIVAR) • Presentar un video corto o relato de una situación real Video comparativo de aceleración de autos. Discusión sobre experiencias cotidianas (bicicleta, moto, videojuegos de carreras). • Pregunta detonadora: ¿crees que exista alguna relación entre la fuerza aplicada a un objeto y la aceleración que éste experimenta? ¿Por qué los autos deportivos alcanzan grandes aceleraciones mientras un tráiler tarda más en ganar velocidad?	¿QUÉ? (CONCEPTUALIZAR) • Exposición del contenido: pintarrón y diapositivas • Ejemplos resueltos paso a paso: cálculo de fuerza, cálculo de aceleración. 
¿CÓMO? (EXPERIMENTAR) • Hacer un experimento en el aula (equipos): carrito con ruedas, objetos con distinta masa. Comparar aceleración con diferentes masas aplicando la misma fuerza.	¿Y SI? (EXTENDER) • Proponer aplicación de la Segunda Ley en un contexto de ingeniería. Ejemplos: motores de videojuegos, drones con carga, robots móviles, etc. Propuesta escrita y socializada.

Figura 1. Esquema de la secuencia didáctica para la segunda ley de Newton. Se utiliza la metodología 4MAT para motivar, conceptualizar, experimentar y extender el concepto físico en cuestión. Fuente: elaboración propia.

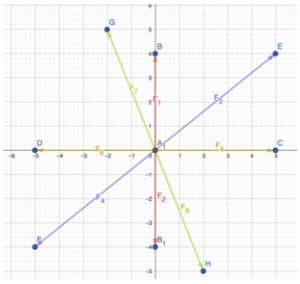
¿POR QUÉ? (MOTIVAR) • Presentar un video corto o relato de una situación real: nadadores empujando el agua, o el despegue de un cohete, personas caminando, una llanta de auto en movimiento. • Pregunta detonadora: Si al caminar empujamos el suelo hacia atrás, ¿por qué avanzamos hacia adelante?	¿QUÉ? (CONCEPTUALIZAR) • Exposición del contenido: pintarrón y diapositivas. • Ejemplos de pares de fuerza acción-reacción. Énfasis en el carácter vectorial de las fuerzas. 
¿CÓMO? (EXPERIMENTAR) • Hacer un experimento en el aula (equipos). Conseguir sillas con ruedas para que dos estudiantes se empujan uno al otro.	¿Y SI? (EXTENDER) Cada equipo propone una aplicación de la Tercera Ley en un contexto de ingeniería en computación o tecnología, por ejemplo: drones, interacción entre hélices y aire; simulación de choques en software.

Figura 2. Esquema de la secuencia didáctica para la tercera ley de Newton. Se utiliza la metodología 4MAT para motivar, conceptualizar, experimentar y extender el concepto físico en cuestión. Fuente: elaboración propia y GeoGebra para ilustrar los vectores en el plano cartesiano.

Al final de la secuencia completa, se puso a disposición de los estudiantes, un breve cuestionario de 6 preguntas de opción múltiple que se calificó en automático y arrojó el resultado una vez terminado el intento. De acuerdo con lo obtenido en dicho cuestionario, se clasificaron dos grupos de trabajo: estudiantes con más del 70% de los aciertos y estudiantes con menos del 70% de los aciertos.

En la sesión posterior a la secuencia didáctica, el trabajo de los estudiantes consistió en resolver una actividad cuyas características generales, dependieron del resultado obtenido en el breve cuestionario de opción múltiple. Para quienes obtuvieron más del 70% de aciertos, la actividad fue un cuestionario reto de problemas conceptuales y aplicados cuya complejidad es igual o ligeramente mayor a los discutidos en la clase expositiva. Para quienes obtuvieron menos del 70% de aciertos, la actividad fue de refuerzo y constó de un cuestionario guiado con ejemplos sencillos y simulaciones PhET. Durante esta sesión los estudiantes abordaron y resolvieron la actividad designada y programada en Moodle. Esta plataforma permite crear grupos para diferenciar recursos y actividades didácticas. La labor del docente es proporcionar a los estudiantes retroalimentación inmediata y resolver las dudas para que completen la actividad en el par de horas asignadas a la clase.

Una vez finalizadas las actividades de carácter adaptativo para el par de grupos diferenciados mediante el resultado del cuestionario de 6 preguntas, quienes hayan tenido asignada la actividad de refuerzo son invitados a responderlo nuevamente para verificar el grado de apoyo que haya podido significar dicha actividad, en la comprensión del concepto físico. A manera de cierre, se asignó al total de los estudiantes del curso una actividad integradora extra-clase diseñada para establecer una liga entre el concepto físico y la vida cotidiana. La figura 3 ilustra las fases generales de una intervención que contempla el concepto físico en turno.

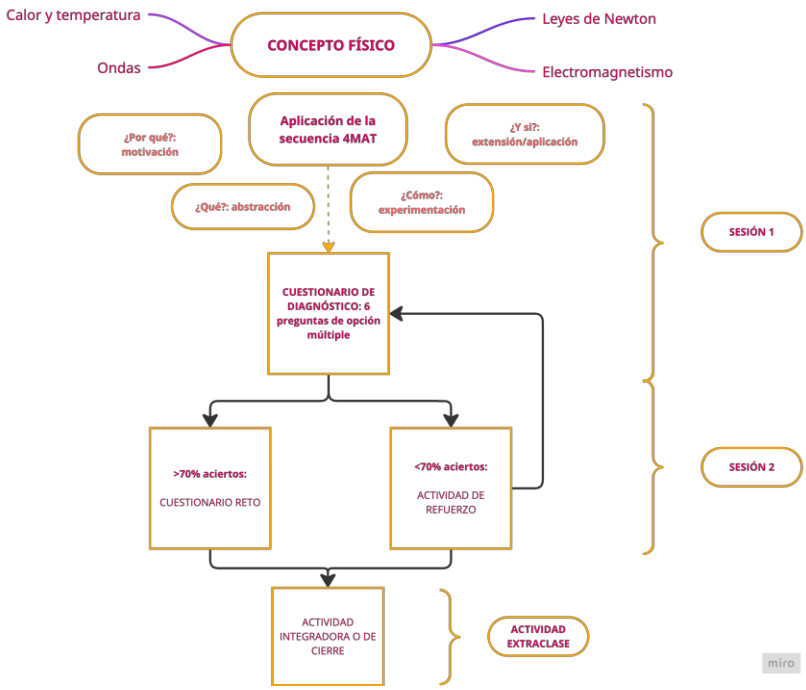


Figura 3. Esquema de la intervención didáctica que incluye dos sesiones. En la primera se aborda, con metodología 4MAT el concepto físico. En la segunda, se distingue entre dos tipos de actividades de carácter adaptativo que dependerán del desempeño obtenido en un breve cuestionario de diagnóstico. La intervención finaliza con una actividad extra-clase. Fuente: elaboración propia.

RESULTADOS

Los instrumentos estandarizados en física educativa fungen como cualquier otro instrumento de la física: miden variables. Para esta investigación se utilizaron dos instrumentos, el Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes et al., 1992) y el Cuestionario sobre Conceptos de Calor y Temperatura (CCCT) (Santana y Ramírez, 2014). El primero mide el dominio de mecánica clásica -leyes de Newton, fuerza, gravedad, aceleración, etc.- y consta de 30 preguntas con 5 respuestas de opción múltiple. El segundo mide el dominio de calor y temperatura y consta de 20 preguntas con 5 respuestas de opción múltiple.

Ambos instrumentos fueron distribuidos mediante un formulario de Google en dos momentos distintos: antes de la instrucción (pre-test) y después de la instrucción (post-test). Los instrumentos contienen un aviso de privacidad y recaban el consentimiento de los estudiantes para utilizar los datos con fines exclusivamente académicos y de investigación. Antes de solicitarles a los estudiantes que respondieran los instrumentos, se les informó del propósito de aplicación de estos y la relevancia de contar con sus respuestas para mejorar el curso. Se les solicitó no utilizar inteligencia artificial para responder.

Se realizó un primer análisis de las respuestas acertadas en el post-test respecto a las respuestas acertadas en el pre-test para ambos instrumentos. En la figura 4 se graficaron los puntajes obtenidos para el FCI, de acuerdo con la expresión denominada puntaje,

$$\boldsymbol{P} = \frac{\boldsymbol{n_i}}{\boldsymbol{N}}. \quad (1)$$

Donde $\boldsymbol{n_i}$ es el número de estudiantes que seleccionó la opción i y $\boldsymbol{N}$ es el número total de respuestas por pregunta. De tal manera que el rango de valores posibles para el puntaje es de 0 a 1.

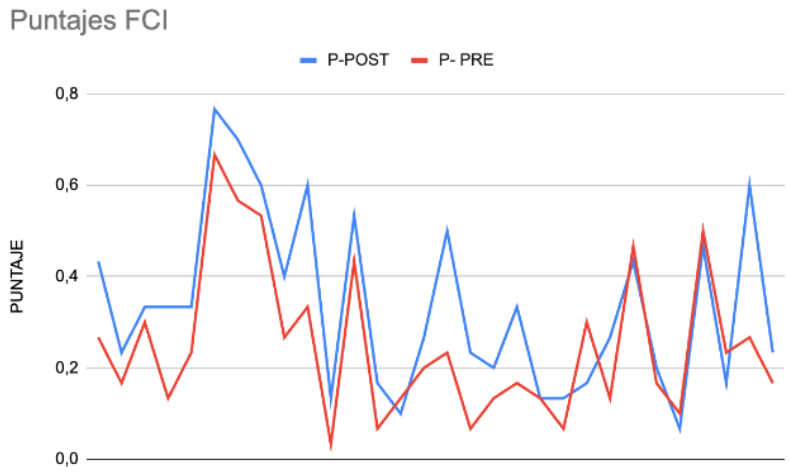


Figura 4. Puntaje obtenido en el FCI. La línea azul es el puntaje del post-test y la línea roja es el puntaje del pre-test. En la línea vertical se tiene el puntaje para cada reactivo del FCI. En la línea horizontal se omitió la numeración de los reactivos para mayor claridad en la gráfica. Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se grafica el puntaje dado por la ecuación (1) para el instrumento CCCT.

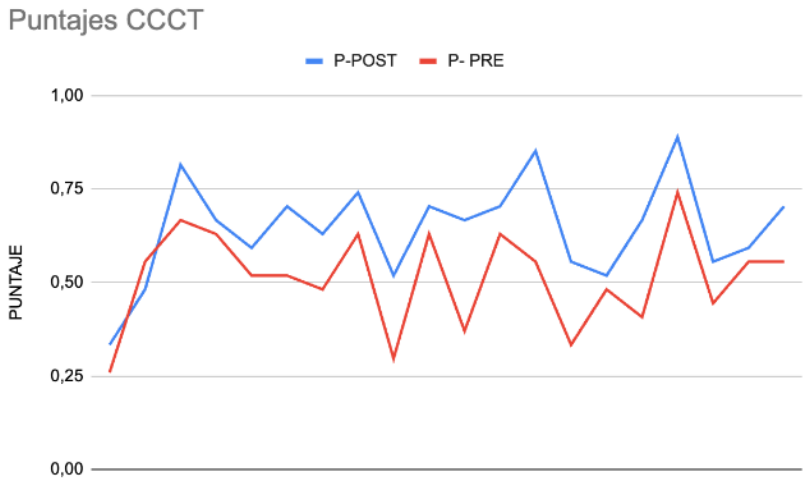


Figura 5. Puntaje obtenido en el CCCT. La línea azul es el puntaje del post-test y la línea roja es el puntaje del pre-test. En la línea vertical se tiene el puntaje para cada reactivo del CCCT. En la línea horizontal se omitió la numeración de los reactivos para mayor claridad en la gráfica. Fuente: elaboración propia.

En una segunda instancia, se analizaron los resultados obtenidos para el pre-test y el post-test de ambos instrumentos FCI y CCCT. El número de estudiantes que respondió el FCI -pre y post- fue de 30. El número de estudiantes que respondió el CCCT -pre y post- fue de 27.

Las tablas 1 y 2 contienen los resultados para FCI y CCCT: en la primera columna el número que identifica a cada estudiante; en la segunda columna, el promedio de cada estudiante para el pre-test; en la tercera columna, el promedio de cada estudiante para el post-test y, en la cuarta columna se muestra el factor de Dellwo (Fadaei, 2019). El valor negativo ocurre porque la calificación promedio del post-test es menor que la del pre-test. Una ganancia alta se considera si el factor es mayor o

igual a 0.7, una ganancia media se considera para un intervalo entre 0.3 y 0.7. Una ganancia de cero se da porque el resultado en el pre y post es idéntico.

Estudiante	Pre-FCI	Post-FCI	Dellwo
1	0,3666666667	0,2	-0,2631578947
2	0,3333333333	0,5666666667	0,35
3	0,1	0,1333333333	0,03703703704
4	0,2333333333	0,3	0,08695652174
5	0,1666666667	0,4	0,28
6	0,1333333333	0,1666666667	0,03846153846
7	0,3	0,5333333333	0,3333333333
8	0,2	0,5	0,375
9	0,6333333333	0,6	-0,09090909091
10	0,2666666667	0,2333333333	-0,04545454545
11	0,1	0,3333333333	0,2592592593
12	0,3666666667	0,2666666667	-0,1578947368
13	0,1666666667	0,3	0,16
14	0,3	0,3666666667	0,09523809524
15	0,3666666667	0,5333333333	0,2631578947
16	0,4	0,4	0
17	0,2333333333	0,3666666667	0,1739130435
18	0,2666666667	0,2666666667	0
19	0,1	0,1333333333	0,03703703704
20	0,1333333333	0,3333333333	0,2307692308
21	0,2333333333	0,1666666667	-0,08695652174
22	0,2333333333	0,1666666667	-0,08695652174
23	0,2333333333	0,7	0,6086956522
24	0,2666666667	0,2666666667	0
25	0,3	0,3	0
26	0,1333333333	0,1	-0,03846153846
27	0,3	0,1333333333	-0,2380952381
28	0,1333333333	0,2333333333	0,1153846154
29	0,2666666667	0,2	-0,09090909091
30	0,2	0,8666666667	0,8333333333

Tabla 1. Análisis de los promedios de cada estudiante para el FCI y cálculo del factor de Dellwo.

Estudiante	Pre-CCCT	Post-CCCT	Dellwo
1	0,2	0,3	0,125
2	0,65	0,6	-0,1428571429
3	0,65	0,05	-1,714285714
4	0,6	0,9	0,75
5	0,4	0,85	0,75
6	0,4	0,8	0,6666666667
7	0,35	0,95	0,9230769231
8	0,3	0,6	0,4285714286
9	0,5	0,65	0,3
10	0,35	0,55	0,3076923077
11	0,4	0,8	0,6666666667
12	0,6	0,7	0,25
13	0,85	0,95	0,6666666667
14	0,55	0,65	0,2222222222
15	0,75	0,9	0,6

16	0,3	0,2	-0,1428571429
17	0,35	0,65	0,4615384615
18	0,65	0,85	0,5714285714
19	0,4	0,35	-0,08333333333
20	0,55	0,7	0,3333333333
21	0,4	0,7	0,5
22	0,6	0,6	0
23	0,55	0,25	-0,6666666667
24	0,75	0,75	0
25	0,65	0,6	-0,1428571429
26	0,55	0,8	0,5555555556
27	0,55	0,55	0

Tabla 2. Análisis de los promedios de cada estudiante para el CCCT y cálculo del factor de Dellwo.

CONCLUSIONES

El aprendizaje de física conceptual a nivel universitario ofrece un reto amplio y sostenido en el tiempo para las instituciones educativas. Las formas de evaluación tradicionales arrojan desempeños pobres y el uso de instrumentos estandarizados es relativamente bajo o nulo, de tal forma que, el conocimiento acerca de las ideas -correctas o no- que tienen los estudiantes y los modelos mentales que usan para explicarse la realidad física no es tan preciso. De lo anterior que, se requiere una intervención pedagógica más alejada de las formas tradicionales y más cercana a las necesidades individuales de los estudiantes. La metodología empleada con un primer nivel de adaptación para atender dichas necesidades arrojó resultados mixtos.

En las figuras 4 y 5 se pueden observar puntajes más altos en el post-test que en el pre-test para ambos instrumentos. Sin embargo, el análisis de la ganancia conceptual arrojó resultados más favorables en el instrumento CCCT que en el FCI. Esto puede deberse a que el FCI es un cuestionario más exhaustivo en cuanto a conceptos de mecánica newtoniana y los distractores en las respuestas son más sofisticados que aquellos del CCCT. Mientras que éste último tiene menos reactivos y plantean fenómenos más inmediatos a la realidad cotidiana.

Paradójicamente los temas revisados con la metodología 4MAT a los que dedicamos más semanas son aquellos de mecánica newtoniana, mientras que los temas abordados sobre calor y temperatura se revisaron hacia el final del curso. Uno de los retos para aplicar una metodología como la 4MAT es la implementación: tuvimos que ser muy disciplinados con los tiempos dedicados a cada sesión y en el diseño de las sesiones, definir los minutos destinados para cada momento de esta. Cabe destacar que los estudiantes presentaron un nivel muy bajo de deserción, esto se puede observar en el número de participantes que respondieron el FCI, 30, y que dicho número disminuyó a 27 -los que respondieron el CCCT- para cuando llegamos a los temas casi últimos de calor y temperatura.

La sesión que destinamos en el laboratorio fue una de las más atractivas para los estudiantes, quienes solicitaron un mayor número de sesiones en dichas instalaciones, que convierten a la clase en una totalmente interactiva y en la que pudieron manipular algunos aparatos.

Finalmente, la constante revisión de metodologías, su diseño cuidadoso e implementación rigurosa, así como la inclusión de más actividades experimentales que se intercalen con las clases teóricas, podrían reforzar los conocimientos no solo para obtener mejores notas en los instrumentos sino para lograr un aprendizaje profundo y significativo que abone a la formación de ciudadanos científicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Castellanos, A. Verduzco, M. Moreno, R. Padilla, y S. Pérez, *Modelo educativo siglo 21*. México: Universidad de Guadalajara, 2007. [En línea]. Disponible en: udg.mx

2. A. S. Fadaei, “Comparing Two Results: Hake Gain and Dellow Gain, to Analyze FCI Data in Active Learning Process,” *US-China Education Review A*, vol. 9, no. 1, pp. 32–39, Jan. 2019.
3. J. Hernández, “Aprendizaje adaptativo en la educación superior,” en *Actas del 8º Congreso Internacional de Innovación Educativa: Tecnologías para la Educación*, 2021, pp. 654–665.
4. D. Hestenes, M. Wells y G. Swackhamer, “Force concept inventory,” *Phys. Teach.*, vol. 30, no. 3, pp. 141–158, 1992.
5. N. Olmedo y O. Farrerons, *Modelos constructivistas de aprendizaje en programas de formación*. España: OmniaScience, 2017. Disponible en: https://doi.org/10.3926/oms.367
6. S. Olmos, E. Torrecilla, J. Mena y A. Rodríguez, “Improving graduate students learning through the use of Moodle,” *Educ. Res. Rev.*, vol. 10, no. 5, pp. 604–614, 2015.
7. M. H. Ramírez, “Aplicación del sistema 4MAT en la enseñanza de la física a nivel universitario,” *Rev. Mex. Fís. E*, vol. 56, no. 1, pp. 29–40, 2010.
8. M. Ramírez y J. L. Santana, “El aprendizaje basado en proyectos y el aprendizaje de conceptos de calor y temperatura mediante aplicaciones en cerámica,” *Innov. Educ.*, vol. 14, no. 66, pp. 41–56, 2014.

DISEÑO DE UN INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN PARA EXPERIMENTOS CIENTÍFICOS EN EL NIVEL PREESCOLAR

Maria Fernanda González Villarreal, Mario Humberto Ramírez Díaz.

Institución Politécnico Nacional, CICATA Unidad Legaria.
mramirezd@ipn.mx

RESUMEN

Ante la necesidad por introducir a los alumnos de preescolar a las ciencias y por la poca variedad de guías o referentes para la docente, nos encontramos con diversos documentos que buscan aportar en este campo, sin embargo, poco se habla de los criterios que estos deberían de tener para que este acercamiento a las ciencias sea significativo y adecuado. Es por esto que el presente trabajo expone el diseño de un instrumento de evaluación enfocado en el campo formativo Saberes y Pensamiento Científico del programa vigente de educación en México la Nueva Escuela Mexicana[1].

INTRODUCCIÓN

El acercamiento a las ciencias en el nivel preescolar en México se ha desarrollado a partir de diferentes estrategias enfocadas de acuerdo a lo establecido en el programa de educación, así mismo esto puede cambiar de acuerdo al programa que sea vigente por lo que no existe un estándar de ciencia para este nivel educativo sino aquellos objetivos o propósitos que marque la Secretaría de Educación Pública (SEP).

Cabe mencionar que, de acuerdo con la SEP, en la educación básica la evaluación puede darse por distintos instrumentos o técnicas que estén enfocadas en la observación y el desempeño de los alumnos[2], donde la educadora es libre de elegir la técnica o instrumento que considere más adecuada para evaluar al alumnado de acuerdo a sus características, actividades, objetivos, tiempos, entre otros.

Debido a la necesidad por adentrar al alumnado de preescolar a las ciencias, nos encontramos con una amplia variedad de documentos, estrategias, actividades y talleres científicos que buscan aportar al desarrollo del pensamiento científico de los alumnos, sin embargo, poco se habla de los criterios que estos deberían de tener para que este acercamiento a las ciencias sea significativo, aporte al desarrollo de las habilidades científicas de los alumnos, impliquen un reto cognitivo adecuado a la edad y que en realidad puedan ser llevados al aula.

Partiendo de lo anteriormente mencionado y con la finalidad de hacer una minuciosa búsqueda de actividades en física para trabajar con alumnos de nivel preescolar para desarrollar una investigación relacionada con el diseño e implementación de actividades que involucren de manera activa a los alumnos y no solo sean observadores, se realizó una revisión a un fichero de actividades científicas para trabajar fenómenos físicos[3] con el objetivo de verificar la viabilidad en la aplicación de los mismos con alumnos de 3 a 6 años de edad como se propone en dicho documento. Para ello se desarrolló un instrumento de evaluación comúnmente utilizado en la evaluación formativa de preescolares denominado “esquema por semáforo” el cual utiliza los principios del semáforo y los adapta en educación como el nivel del logro que el estudiante debe tener frente a los objetivos específicos a evaluar.

TEORÍA

El esquema por semáforo consta de una escala gráfica que funciona como guía visual mediante el uso de colores, los cuales ayudan al docente e incluso a los alumnos a identificar el nivel del logro

con respecto a las metas u objetivos del aprendizaje[4]. La gráfica utiliza tres colores codificados: verde, logrado; amarillo, en proceso; y rojo, no logrado, sin embargo, también se implementa el naranja como necesita ayuda, a fin de agregar un criterio más en el que se especifica el nivel de logro del alumno con respecto a lo observado en su desempeño.

En algunos casos, este instrumento de evaluación incluye un apartado de observaciones en donde la docente escribe exactamente qué requiere fortalecer el alumno para el logro del aprendizaje. Incluso en el nivel preescolar, esta escala puede ser utilizada como un recurso de autoevaluación del alumno mediante la implementación de imágenes que expresen su nivel de comprensión; estos criterios pueden variar de acuerdo con el docente, institución o lineamientos establecidos por la SEP de cada estado de México.

PARTE EXPERIMENTAL

Este trabajo presenta el diseño e implementación del instrumento que utiliza el esquema por "semaforización" y la escala de rango como recomienda la SEP[3], además de tomar ideas o elementos que de otros formatos de evaluación de acuerdo a la experiencia propia. El objetivo de desarrollar un instrumento de este estilo es con la finalidad de analizar qué tipo de actividades o experimentos científicos, específicamente de física, se están presentando a las educadoras y si estos son del todo adecuados o requieren alguna modificación para poder ser llevados al aula. El fichero presenta un total de 19 experimentos dividido en cinco secciones, los cuales fueron evaluados de acuerdo con los criterios que se presentan en este trabajo.

El instrumento consta de dos partes: la primera, *Criterios de evaluación de actividades* (ver Figura 1), se centra en el esquema por semáforos mediante una escala de rango donde se encuentran a detalle las pautas de evaluación; y la segunda se centra en la evaluación de los experimentos (ver Figura 2) la cual está dividida por secciones de acuerdo al fichero que se analizó, sin embargo, esta parte puede ser adecuada al tipo de documento a revisar.

Figura 1. Semáforo/Escala de rango - Criterios de evaluación de actividades.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDADES		
COLOR	CONCEPTO	DESCRIPCIÓN
VERDE	Relevante	El experimento es relevante para los alumnos, representa un reto cognitivo adecuado y facilita la adquisición de conceptos básicos de física para preescolar. Está directamente relacionado con los objetivos de investigación.
AMARILLO	Requiere adecuación	Parte del experimento requiere modificación para que sea adecuada, relevante, represente un reto cognitivo o facilite la adquisición de conceptos básicos de física para preescolar. Está parcialmente relacionado con los objetivos de investigación.
NARANJA	Relacionada	Algunos elementos del experimento son relevantes para los alumnos, representan algún reto o facilita la adquisición de conceptos. Se relacionan o contribuyen con los objetivos de la investigación.
ROJO	No se es adecuada	El experimento representa un reto cognitivo superior al nivel preescolar, no es práctica o es compleja para demostrar, realizar o comprender algún concepto básico de física para preescolar. No está relacionado con los objetivos de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

El semáforo consta de los siguientes criterios de evaluación para las actividades mediante un código de color-concepto: 1) Verde–Relevante, 2) Amarillo–Requiere adecuación, 3) Naranja–Relacionado y 4) Rojo–No es adecuada. Cada criterio recibe una descripción específica para identificar qué cualidades son las necesarias para poder aplicar una actividad de acuerdo con la relevancia, el reto cognitivo y adquisición de conceptos.

Por ejemplo, para el primer criterio (verde), el concepto es *Relevante* donde la descripción se refiere a: *El experimento es relevante para los alumnos, representa un reto cognitivo adecuado y facilita la adquisición de conceptos básicos de física para preescolar*. *Está directamente relacionada con los*

objetivos de investigación. Para el tercer criterio (naranja), el concepto es Relacionado donde la descripción se refiere a: *Algunos elementos del experimento son relevantes para los alumnos, representan algún reto o facilita la adquisición de conceptos. Se relacionan o contribuyen con los objetivos de la investigación.*

La escala de rango está dividida por secciones temáticas: fluidos, equilibrio mecánico, electroestática y magnetismo, óptica y percepción. Estas secciones a su vez están organizadas por los siguientes criterios: nombre de la actividad, estatus y observaciones. Esta segunda parte del instrumento está pensada organizada de tal manera que se pueda identificar el nivel de criterio (estatus) de verde a rojo, en el que se encuentra la actividad y poder fundamentar en las observaciones el por qué se evaluó de esa manera.

Figura 2. Escala de rango – Equilibrio mecánico

EQUILIBRIO MECÁNICO		
NOMBRE DE LA FICHA	ESTATUS	OBSERVACIONES
Equilibra una figura		Modificación en la explicación de acuerdo al grado (1ro solo equilibrio/ 2do y 3ro fuerza de gravedad).
Mantén el barco a flote		No es adecuada para todos los grados ya que el reto cognitivo es elevado (solo para 3ro).
Equilibra los tenedores		Materiales inadecuados (pueden ocasionar accidentes).
Sostén arena con un palo		El ejemplo inicial es adecuado y relevante para los alumnos. El experimento no es adecuado para todos los grados. En la explicación utilizaría otros ejemplos (en su mayoría físicos/contacto) para explicar que se enganchan o forman cadenas.

Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, en la sección de *fluidos*, la actividad *Consigue que el humo no suba* el estatus que se le asignó fue *Rojo-No es adecuada* fundamentando en las observaciones que: *El uso de fuego y humo (de esa manera) es de alto riesgo para la integridad de los alumnos. El concepto de densidad y temperatura en el humo es complejo para preescolar.*

Como se menciona con anterioridad, el instrumento busca analizar a profundidad el tipo de actividades que se están presentando para trabajar con alumnos de 3 a 6 años de edad por lo que, si en el instrumento alguna actividad se evaluó como, por ejemplo, *Naranja-Relacionada* o *Rojo-No es adecuada*, no quiere decir que no pueda ser implementada, sino que de acuerdo a la actividad y las observaciones se deben realizar modificaciones o adecuaciones para que tanto un niño de primero de preescolar (3 años) como uno de tercero (6 años) puedan realizar las actividades de acuerdo a su periodo de atención, el reto cognitivo y la seguridad.

Por ejemplo, en la sección de equilibrio mecánico, la actividad *Equilibra tenedores* tiene un estatus que se le asignó fue *Rojo-No es adecuada* sin embargo en las observaciones se menciona que los materiales son inadecuados o podrían ocasionar un accidente, por lo que solo debe modificarse el material por otro que no supongan un riesgo para los estudiantes mientras que el desarrollo de la actividad en sí puede ser implementada como se presenta en el fichero.

RESULTADOS

De acuerdo a los criterios de evaluación presentados en el instrumento, los resultados demuestran lo siguiente (ver Tabla 1): De 9 experimentos sobre *Fluidos;* 1 se encuentra en el nivel *Relevante*, 1 en nivel *Requiere adecuación*, 2 en nivel *Relacionada* y 5 en nivel *No es adecuada*. Para la temática de *Equilibrio mecánico*, de 4 experimentos; 1 se encuentra en el nivel *Relevante*, 1 en nivel *Requiere adecuación*, 1 en nivel *Relacionada* y 1 en nivel *No es adecuada*. De 2 experimentos sobre *Óptica*; 1 está en nivel *Relevante* y 1 en nivel *Requiere adecuación*. De 2 experimentos sobre la temática

Electroestática y magnetismo, ambos se encuentran en el nivel *Relevante*. Por último, para el tema de *Percepción*; los 2 experimentos se encuentran en el nivel *Relevante*.

Tabla 1. Tabla de concentrado.

Sección temática	Relevante	Requiere adecuación	Relacionada	No es adecuada	Total de actividades
Fluidos	1	1	2	5	9
Equilibrio mecánico	1	1	1	1	4
Óptica	1	1	-	-	2
Electrostática y magnetismo	2	-	-	-	2
Percepción	2	-	-	-	2
TOTAL	7	3	3	6	19

Fuente: Elaboración propia.

Con fines ilustrativos y para ejemplificar los resultados, se presentan cuatro ejemplos de los experimentos evaluados de cada criterio. El experimento *Pon a flotar plastilina* de la temática de *Fluidos*, se catalogó en verde (Relevante) porque es adecuado para llevarse a cabo en el aula, se utilizan materiales de bajo costo y fáciles de trabajar con alumnos de 3 a 6 años, el concepto de fluido se aborda desde una explicación sencilla pero con cierto reto cognitivo al solicitar a los alumnos que primeramente formen una bolita de plastilina y la coloquen en un recipiente con agua para después modificarla y puedan hacer comparaciones con respecto a lo que están observando. (ver Figura 3).

Figura 3. Escala de rango – Fluidos. Pon a flotar la plastilina.

Pon a flotar la plastilina		Solicitaría a los alumnos realizar diversas figuras en plastilina y hacer comparación.

Fuente: Elaboración propia.

Además, los alumnos son agentes activos y están “poniendo manos a la obra” al manipular los materiales haciendo de esto un aprendizaje significativo (ver Figura 4). Como observación, se menciona que podría solicitarse a los alumnos realizar diversas figuras de plastilina y que hagan una comparación, por ejemplo, mediante una tabla o grafica para ampliar tanto la observación como la explicación de los estudiantes.

Figura 4. Pon a flotar la plastilina.

Propósito

Lograr que las niñas y los niños reflexionen y expliquen con sus propias palabras un fenómeno a partir de una situación observable y lo contrasten con sus ideas.

Desarrollo

Inicia la actividad preguntándoles a las niñas y a los niños: ¿qué pasaría si ponemos un trozo

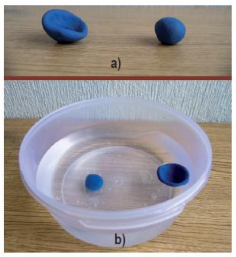


Figura 1. a) Formas sugeridas de la plastilina que se colocarán en el agua. b) Una de ellas flota, mientras que la otra, la pequeña esfera, se hunde.

Fuente: M. Martínez Aguilera, et al, "Fichero de actividades de experimentación para niños y niñas en edad preescolar: Fenómenos Físicos".

Como segundo ejemplo, el experimento *Haz que se quiebre un lápiz y que aparezca una moneda* de la temática de Óptica, se catalogó en amarillo (Requiere adecuación) debido a que el experimento no es adecuado para todos los grados de preescolar (ver Figura 6) y se recomienda trabajarlo con segundo (4 y 5 años) y tercero (5 y 6 años) puesto a que a nivel cognitivo el tema de refracción de la luz resulta ser abstracto, por lo que es a partir de estos años donde el estudiante puede establecer relaciones entre los atributos de los objetos que percibe del mundo físico[5]. Por lo tanto, el alumno de menor rango de edad aún no se encuentra en un nivel de desarrollo favorable para llevar a cabo este experimento (ver Figura 7).

Figura 6. Escala de rango – Óptica. Haz que se quiebre un lápiz y que aparezca una moneda.

Haz que se quiebre un lápiz y que aparezca una moneda		No es adecuada para todos los grados debido a la complejidad del reto cognitivo (sólo 2do y 3ro).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Haz que se quiebre un lápiz y que aparezca una moneda.

Propósito

Lograr que las niñas y los niños reflexionen acerca de un fenómeno y lo expliquen a partir de una situación observable.

Desarrollo

Pregunta al grupo si pueden romper un lápiz sin tocarlo. ¿Piensan es posible hacer eso?, ¿cómo lo harían?



Figura 1. El lápiz dentro de un vaso transparente con agua, a la vista parece que se ha quebrado.

Fuente: M. Martínez Aguilera, et al, "Fichero de actividades de experimentación para niños y niñas en edad preescolar: Fenómenos Físicos".

Por otro lado, para el criterio en naranja (Relacionada) el experimento que se catalogó de la temática de *Equilibrio mecánico* fue *Mantén el barco a flote*, esto debido a que se considera que no es

adecuada para todos los grados ya que el reto cognitivo es elevado debido a que dentro de la explicación que debe dar la educadora, el concepto de centro de masa es más elevado para un estudiante de primero de preescolar (3 y 4 años) a uno de tercero de preescolar (5 y 6 años), por lo que sería importante tener mayor tiempo para dar una explicación e incluso considerar varias sesiones donde se aborde este tema (ver Figura 8).

Figura 8. Escala de rango – Equilibrio mecánico. Mantén el barco a flote.

Mantén el barco a flote		No es adecuada para todos los grados ya que el reto cognitivo es elevado (solo para 3ro).

Fuente: Elaboración propia.

Si bien no hay que infravalorar las capacidades de los alumnos, si es de gran importancia valorar qué tan efectiva sería la actividad o relevante para su contexto inmediato, por ejemplo, ¿qué necesita saber el alumno sobre centro de masa? ¿en qué otro momento de su rutina diaria lo utilizaría? ¿con qué finalidad? ¿cómo daría la explicación la maestra? (ver Figura 9).

Figura 9. Mantén el barco a flote.

Propósito

Propiciar que las niñas y los niños den sus propias explicaciones a partir de alterar las condiciones de un proceso

Desarrollo

Pide a las niñas y los niños que se sienten en medio círculo, de tal manera que puedan obser-



Figura 1. "Barquito" construido a partir de un vaso desechable de plástico con un mástil de popote, y una esfera de plastilina en la parte superior del mástil. A un lado y un puñado de piedras pequrñas,

Fuente: M. Martínez Aguilera, et al, "Fichero de actividades de experimentación para niños y niñas en edad preescolar: Fenómenos Físicos".

El cuarto experimento a ejemplificar es *Consigue que el humo no suba* de la temática *Fluidos*, el cual se catalogó en rojo (No es adecuada) ya que principalmente el uso de fuego y humo es de alto riesgo para la integridad de los alumnos, si bien se coloca una advertencia al inicio, este material no debería ser considerado bajo ninguna circunstancia puesto a que podrían pasar accidentes por mayor control de grupo tenga la docente, además que podría presentarse alguna situación donde el alumno busque replicarlo bajo sus propios medios (ver Figura 10).

Figura 10. Consigue que el humo no suba.

Este experimento requiere el uso de fuego, por lo que se recomienda que el educador o la educadora lo prenda y controle

Competencia

Entiende en qué consiste un experimento y anticipa lo que puede suceder cuando aplica uno de ellos para poner a prueba una idea.

Aprendizajes esperados

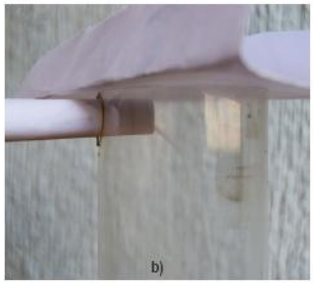
Sigue normas de seguridad al utilizar materiales, herramientas e instrumentos al experimentar.

Propósito

Fortalecer en las niñas y los niños sus capacidades de observación, planteamiento de hipótesis, elaboración de inferencias y predicciones mediante la realización de un experimento.

Figura 1. Con los materiales en su lugar, puede observarse en la fotografía b que el humo desciende dentro del tubo, en lugar de ascender.





Fuente: M. Martínez Aguilera, et al, “Fichero de actividades de experimentación para niños y niñas en edad preescolar: Fenómenos Físicos”.

Por otra parte, el concepto de densidad y temperatura del humo cae en un concepto abstracto que nuevamente requiere de un desarrollo cognitivo mayor al que tienen los alumnos de nivel preescolar (ver Figura 6). Este experimento no debería ser considerado ni siquiera teniendo apoyo de vigilancia de alguna maestra asistente, colega del centro de trabajo o incluso de padres de familia pues se requiere que todos los que vayan a demostrarlo tengan conocimiento sobre cómo ejecutarlo. Es de suma importancia considerar siempre la seguridad de los estudiantes, pues el trabajo del científico también contempla la seguridad para llevar a cabo sus investigaciones que es lo que se busca fomentar en los educandos, ser científicos y no solo ser observadores.

Figura 11. Escala de rango – Fluidos. Consigue que el humo no suba.

Consigue que el humo no suba		El uso de fuego y humo (de esa manera) es de alto riesgo para la integridad de los alumnos. El concepto de densidad y temperatura en el humo es complejo para preescolar.

Fuente: Elaboración propia.

Ante estos resultados, encontramos que de 19 experimentos presentados para trabajar física en el nivel preescolar; 7 (37%) se encuentra en el nivel *Relevante*, 3 (16%) en nivel *Requiere adecuación*, 3 (16%) en nivel *Relacionada* y 6 (31%) en nivel *No es adecuada*. Esto quiere decir que, de acuerdo al instrumento de evaluación, alrededor del 37% de los experimentos resultan ser relevantes para los alumnos de nivel preescolar puesto a que les representa un reto cognitivo adecuado y facilita la adquisición de conceptos básicos de física. Sin embargo, también encontramos que el 31% de los experimentos resultan ser inadecuados para los alumnos ya que representan un reto cognitivo superior al nivel preescolar, no son prácticos o son complejos para demostrar, realizar o comprender algún concepto básico de física en clase.

CONCLUSIONES

El instrumento fue desarrollado principalmente para identificar la efectividad y viabilidad de las actividades de física que se proponen para preescolar, en distintos documentos, artículos e incluso investigaciones, partiendo del enfoque aprender-haciendo en donde el alumno debe ser reconocido como el centro del aprendizaje donde este directamente involucrado en los experimentos y se convierta en un agente activo.

A su vez este instrumento debe ser considerado como una guía para la educadora en cuanto a qué actividad sería la más adecuada para trabajar en el salón y que al leer las observaciones pueda decidir si llevarla a cabo como se menciona en el fichero o hacer las adecuaciones pertinentes como se especifica en el apartado correspondiente del instrumento.

Consideramos importante hacer una revisión crítica a las propuestas de actividades o experimentos que se encuentran en las diversas fuentes bibliográficas, para verificar que estas siempre tengan un propósito u objetivo claro y estén a favor del desarrollo del pensamiento científico en el nivel preescolar, esto quiere decir que deben significar un reto cognitivo que lleve al estudiante a indagar más acerca del mundo que le rodea. Como recomendación, si las actividades son presentadas únicamente como llamativas o innovadoras, sería ideal que la educadora pueda discernir entre si sería lo más adecuado para abordar en su salón o si simplemente son para impresionar al alumno.

BIBLIOGRAFÍA

1. SEP, “Programa de Estudio para la Educación Preescolar: Programa Sintético de la Fase 2”, SEP, 2024, pp. 29-41.
2. SEP, “4. Los Instrumentos de Evaluación desde el Enfoque Formativo”, SEP, 2013, pp. 57-58.
3. M. Martínez Aguilera, et al, “Fichero de actividades de experimentación para niños y niñas en edad preescolar: Fenómenos Físicos”, Secretaría de Innovación, Ciencia y Educación Superior, 2017, pp. 18-85.
4. A. Pinzón, P. Gómez, I. Romero, “Esquema de los semáforos: una estrategia de evaluación formative para compartir metas”, RECME, Vol. 1, 1, 2015, pp. 66-68.
5. M.P. Loya Zurita, “Estudio del Proceso de Abstracción de Niños de 6 a 7 años en Diferentes Ambientes de Aprendizaje”, Consejo Mexicano de Investigación Educativa, Memoria Electrónica del XVII Congreso Nacional de Investigación Educativa, 2024, pp. 1-9.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN LÁSER DE FIBRA DE AMARRE DE MODOS PASIVO: APROXIMACIÓN ESCALAR

Hugo Enrique Ibarra Villalón[1*], Keyla Aranza Sánchez Torres[1], Armando Gómez Vieyra[1], José Rubén Luevano Enríquez[1], Yazmin Esmeralda Bracamontes Rodríguez[2], Luis Martín González Vidal[3], Olivier Pottiez[3]

[1]División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco,[2]Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, CICESE-UAM, Monterrey, [3]Centro de Investigaciones en Óptica A. C.
*heiv@azc.uam.mx

RESUMEN

Los láseres de fibra óptica de amarre de modos pasivo son dispositivos capaces de generar pulsos cortos (ns) y ultracortos (ps y fs) a un bajo costo debido a que no necesitan instalaciones eléctricas especiales ni sistemas de enfriamiento, lo que actualmente los convierte en una tecnología fundamental para diversas aplicaciones. Este tipo de láseres opera en un régimen pulsado mediante un mecanismo de amarre de modos pasivo, en el cual interviene la acción de un absorbedor saturable en combinación con efectos lineales y no lineales inducidos en la fibra óptica que conforma la cavidad. El análisis experimental y de simulación numérica es fundamental para optimizar el funcionamiento de estos sistemas. Por consiguiente, en este trabajo se presenta un modelo numérico para simular la operación de un láser de fibra dopada con erbio de amarre de modos pasivo, el cual consiste en una arquitectura de cavidad de anillo de 20 m conformada por segmentos de fibra monomodal estándar (SMF-28) y fibra dopada con erbio (EDF). En particular, la metodología empleada en la simulación numérica de este láser consiste en reproducir cada uno de los elementos y mecanismos de operación de la cavidad a partir del modelo de la ecuación de Schrödinger no lineal (NLSE) bajo una versión escalar; esta ecuación introduce los efectos lineales y no lineales inducidos en la fibra. Por otro lado, a pesar de que el láser funciona con un absorbedor saturable artificial basado en el efecto de rotación de polarización lineal, en este trabajo se propuso una representación escalar del mismo, ignorando las componentes de polarización, con el objetivo de reproducir su respuesta en transmisión dependiente de la potencia. Como resultado, a partir de la simulación de la configuración propuesta, evaluada a lo largo de 1000 ciclos de operación en la cavidad, se identificaron dos regímenes de pulsos: molécula de solitones y pulsos de ruido, los cuales son consistentes con resultados experimentales reportados en este tipo de láseres1. En el primer caso, la molécula de solitones se validó como un régimen de pulsos con una separación temporal definida y un comportamiento estable a nivel espectral y temporal. En contraste, el régimen de pulsos de ruido se caracterizó por una dinámica altamente fluctuante, con variaciones significativas en los perfiles temporal y espectral. Estos resultados evidencian que el modelo escalar propuesto es capaz de reproducir la operación pulsada de láseres de fibra de amarre de modos pasivo, validando su capacidad predictiva. Como conclusión, los resultados obtenidos demuestran que el modelo escalar basado en la ecuación de Schrödinger no lineal permite incorporar de manera efectiva los efectos asociados a la polarización mediante una representación equivalente del absorbedor saturable, sin recurrir a un modelo vectorial acoplado en las componentes ortogonales de polarización. Esta aproximación reduce el costo computacional y conserva la capacidad de reproducir la dinámica fundamental del sistema.

INTRODUCCIÓN

El láser (LASER, por sus siglas en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) es un dispositivo que emite un haz de luz altamente coherente a partir de un mecanismo que promueve la contribución simultánea de los efectos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada [1]. En particular, los láseres de fibra óptica, al igual que otro tipo de láseres, consta de tres elementos

básicos: bombeo óptico, medio activo y una cavidad [2,3]. El medio activo consiste en fibra óptica dopada con iones de tierras raras, tales como erbio, tulio o iterbio, entre otros, proporcionando la amplificación óptica necesaria [2]. El bombeo óptico suele realizarse mediante un diodo láser (DL) que emite a una longitud de onda en la que la fibra dopada exhibe una alta absorción. Por otro lado, la cavidad resonante está conformada en mayor proporción por fibra óptica y puede adoptar diferentes arquitecturas, estas pueden ser de tipo lineal, una configuración de anillo o figura de ocho [3]. Adicionalmente, es importante precisar que este tipo de láseres pueden operar en un régimen de onda continua o en modo pulsado.

Por otra parte, es importante precisar que en los láseres de fibra es necesario implementar un mecanismo de amarre de modos para que la cavidad de fibra pueda generar pulsos cortos (ns) y ultracortos (ps y fs) [3, 4]. En general, el amarre de modos asegura que todos los modos estén sincronizados para generar un tren de pulsos periódico bien definido, lo cual implica introducir un mecanismo que permita alcanzar una condición de fase constante entre los modos longitudinales de la cavidad [4]. Existen dos tipos de esta técnica: amarre de modos activo y amarre de modos pasivo; el amarre de modos activo consiste en introducir un elemento externo en la cavidad para modular periódicamente las pérdidas en la cavidad mediante un modulador electro-óptico o acusto-óptico; por otro lado, el amarre de modos pasivo utiliza un absorbedor saturable dentro de la cavidad láser de fibra [4,5]. Específicamente, un absorbedor saturable es un elemento que tiene la propiedad de atenuar componentes de baja intensidad óptica y transmitir las de alta intensidad, lo cual se traduce en un filtro no lineal en transmisión que favorece la generación de pulsos. Esta respuesta en transmisión se puede alcanzar con distintos materiales que presenten esta característica, así como a través de interferómetros de fibra o de la transmisión de algún elemento en la cavidad, específicamente un polarizador lineal, cuya respuesta no lineal no es intrínseca al elemento, sino que se alcanza como consecuencia de los efectos no lineales inducidos en la cavidad [3-5].

La investigación sobre la generación de pulsos múltiples en láseres de fibra de amarre de modos pasivo es de gran relevancia para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Estos dispositivos presentan ventajas significativas en comparación con otros tipos de láseres [2], tales como los láseres de semiconductor, de gas, de plasma o de estado sólido, debido a su capacidad para emitir longitudes de onda difíciles de alcanzar [6], así como como la posibilidad de generar pulsos cortos y ultracortos (del orden de ns, ps y fs) con una alta eficiencia y bajo costo [4-6]. En particular, este tipo de láseres de fibra para operar en modo pulsado utiliza efectos no lineales inducidos en la fibra óptica, debido al confinamiento de la luz en una sección transversal reducida a lo largo de grandes distancias [7], sin la necesidad de introducir un cristal no lineal, lo cual reduce el costo de operación. Adicionalmente, la fibra óptica y las componentes que se utilizan en la cavidad de estos láseres son tecnologías que no requieren instalaciones eléctricas especiales, ni sistemas de enfriamiento, lo cual reafirma su bajo costo de operación [2]. Como resultado, los pulsos generados en los láseres de fibra de amarre de modos pasivo son atractivos para diversas aplicaciones, principalmente en óptica no lineal [8], ciencias biomédicas [9], metrología óptica [10], espectroscopia [11], generación de supercontinuo [12], entre otras. Sin embargo, los mecanismos de operación de este tipo de láseres son complejos debido a la interacción entre efectos no lineales y diversos parámetros físicos (longitud de onda de emisión, dispersión cromática, pérdidas de la fibra, ganancia del medio activo) y operacionales (potencia de bombeo, longitud de la cavidad, distribución de las componentes, control de la polarización, control de la dispersión, modulación del absorbedor saturable) de la cavidad [2-5]. Por consiguiente, es de suma importancia establecer una metodología para simular este tipo de láseres con el menor tiempo computacional posible sin demandar una infraestructura computacional sofisticada.

En este trabajo se presenta la metodología para simular un láser de fibra dopada con erbio de amarre de modos pasivo, mostrando el algoritmo a seguir, así como los resultados obtenidos. En una primera fase, se describe el modelo de propagación de la ecuación de Schrödinger no líneal (NLSE, por sus siglas en inglés *nonlinear Schrödinger equation*) en una versión escalar. Al mismo tiempo, se describe el método numérico utilizado para integrar numéricamente dicha ecuación. Adicionalmente, se describen los elementos necesarios para construir un láser de fibra de amarre de modos pasivo. Posteriormente, se describe a detalle el algoritmo a seguir para simular la operación pulsada de una

cavidad de anillo de 20 m, discutiendo las representaciones numéricas para cada una de las secciones que la conforman. Consecutivamente, se analiza la generación de dos regímenes de pulsos en la cavidad: molécula de solitones y pulso de ruido. Finalmente, se presentan las conclusiones.

TEORÍA

Modelo de propagación de la NLSE en fibra óptica

La NLSE es un modelo matemático de una ecuación diferencial no lineal en derivadas parciales utilizado para describir la propagación de pulsos ópticos en fibra óptica monomodal, la cual introduce su respuesta óptica no lineal instantánea y retardada [7]. La NLSE, descrita en el marco de la teoría clásica del electromagnetismo, es definida como:

$$\frac{\partial}{\partial z}A(z,T) = \left(\hat{L} + \hat{N}\right)A(z,T), \qquad (1)$$

donde $A(z,T)$ es el perfil temporal del pulso, z es la variable de la distancia de propagación, $T = t - z/vg$ es el tiempo en un marco de referencia que se mueve a la velocidad de grupo v_g del pulso, $\hat{L}$ es un operador lineal y $\hat{N}$ es un operador no lineal. El operador $\hat{L}$ introduce lo efectos lineales involucrado en la propagación del pulso, en la simulación del láser dicho operador introduce las contribuciones de la dispersión de segundo orden, la ganancia del medio activo y las pérdidas de la fibra, cuya expresión se define como:

$$\hat{L} = -\frac{i}{2!}\beta_2\frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{g}{2} - \frac{a}{2}, \qquad (2)$$

donde β_2 es el coeficiente de dispersión de segundo orden, g es la ganancia y a es el coeficiente de atenuación. El operador $\hat{N}$ introduce los efectos no lineales inducidos en la fibra, en el caso de la simulación se considera únicamente la contribución de la automodulación de fase, la cual es una manifestación del efecto Kerr, cuya expresión se define como:

$$\hat{N} = i\gamma|A|^2, \qquad (3)$$

donde γ es el coeficiente no lineal de la fibra.

En este contexto, la NLSE definida en la Ec. 1 bajo los operadores respectivos (Ecs. 2-3) describe la variación del perfil temporal del pulso $A(z,T)$, por ende, del perfil de intensidad $|A(z,T)|^2$, conforme se propaga a lo largo del eje z bajo las contribuciones de la dispersión de segundo orden, las pérdidas y el efecto Kerr, así como la ganancia introducida por fibra dopadas con alguna tierra rara, las cuales se utilizan como medio activo en el láser.

Para integrar numéricamente la NLSE (Ec. 1) se reporta al método de Fourier de división de paso simetrizado (S-SSFM, por sus siglas en inglés *symmetrized split-step Fourier method*) como una opción eficiente que introduce un adecuado nivel de estabilidad y convergencia en la solución numérica del perfil temporal del pulso [13]. Este método consiste en una secuencia de tres sub-pasos a cada paso iterativo h, tal como se ilustra en la figura 1. Particularmente, la contribución del operador lineal $\hat{L}$ es integrada en dos subpasos, los cuales son alternados entre un subpaso en el que se integra la parte no lineal $\hat{N}$. En consecuencia, el m-ésimo paso iterativo del método S-SSFM es expresado de la siguiente forma:

$$A(z_m,T) = \mathcal{F}^{-1}\left\{e^{e^{\frac{h}{2}\hat{L}(\omega)}}F\left[e^{h\hat{N}}\mathcal{F}^{-1}\left(e^{e^{\frac{h}{2}\hat{L}(\omega)}}\mathcal{F}\left(A(z_{m-1},T)\right)\right)\right]\right\}, \qquad (4)$$

donde $\mathcal{F}$ es la transformada de Fourier y $\mathcal{F}^{-1}$ su inversa, respectivamente, $\hat{N}$ es el operador no lineal definido en el dominio temporal y $\hat{L}(\omega)$ es el operador lineal en el dominio de la frecuencia.

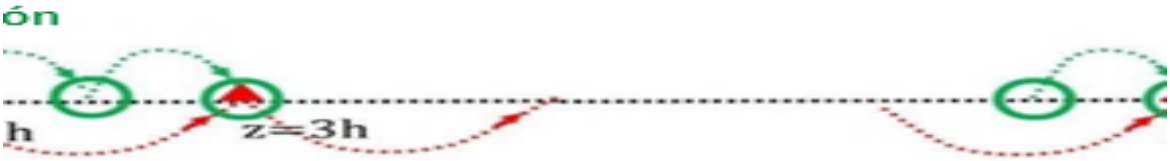


Figura 1. Esquema de la secuencia de subpasos aplicados en el método S-SSFM.

Láser de fibra de amarre de modos pasivo

Los láseres de fibra de amarre de modos pasivo se destacan por su capacidad para operar en distintos regímenes pulsados, desde estados estacionarios hasta dinámicas caóticas [3-5]. Estos regímenes de operación son disipativos al estar influenciados bajo una dinámica de las pérdidas y ganancias de la cavidad. Al mismo tiempo, los parámetros físicos y operacionales tienen un papel crucial en los regímenes de pulsos generados.

Un esquema de un láser de fibra de amarre de modos pasivo está compuesto por elementos fundamentales que permiten la generación de pulsos ultracortos [4], dichos elementos se ilustran en la Fig. 2. Como todo láser consta de tres elementos básicos: cavidad resonante, en este caso con una arquitectura de anillo, un bombeo óptico y un medio de ganancia, este último introducido por una fibra dopada con alguna tierra rara, como se discutió en Introducción. Adicionalmente, la cavidad tiene otros elementos fundamentales para alcanzar la operación en modo pulsado, entre estos se hace mención del aislador óptico, cuya función es asegurar la propagación unidireccional de la luz dentro de la cavidad. Otro elemento es el absorbedor saturable (AS), el cual actúa como un filtro no lineal en transmisión que delimita señales de baja y alta intensidad, permitiendo la formación de pulsos. Por otro lado, el medio de ganancia está constituido por una fibra dopada con una tierra rara que es excitada por una fuente de bombeo óptico (generalmente un diodo láser), el cual emite en una longitud de onda que coincide con la banda de absorción de los iones de la tierra rara. Adicionalmente, se introduce un controlador de polarización para ajustar el estado de polarización de la luz a la cual opera la cavidad y puede favorecer a la operación pulsada del láser. Al mismo tiempo, la cavidad al estar conformada por fibra óptica opera bajo efectos ópticos no lineales inducidos en este guía de onda, los cuales influyen el proceso de formación y dinámicas de pulsos dentro de la cavidad.

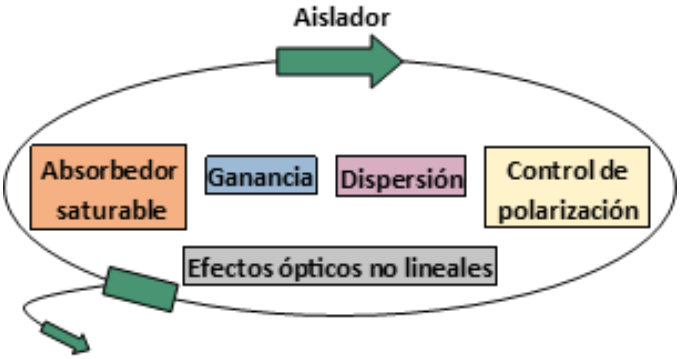


Figura 2. Esquema de los elementos de un láser de fibra de amarre de modos pasivo en una configuración de cavidad de anillo.

En particular, de las diferentes configuraciones que se puede introducir un mecanismo de absorbedor saturable, discutidas en la Introducción, se hace énfasis de la utilización de un polarizador lineal, el cual puede alcanzar una característica en transmisión no lineal en potencia conducida por el efecto

de rotación de polarización no lineal (NPR, por sus siglas en inglés *nonlinear polarization rotation*) [4]. En principio, esta configuración del polarizador y el efecto de NPR, ilustrado en la Fig. 3, consiste en introducir un estado de polarización elíptica en la señal óptica con ayuda de un controlador de polarización que se propaga por un segmento de fibra hasta llegarse a transmitir por el polarizador. Como resultado, a bajas potencias la elipse no rotará y puede alcanzar una transmisión mínima si la elipse tiene una orientación ortogonal con respecto a la orientación del polarizador, como se muestra en la Fig. 3. En contraparte, a altas potencias la elipse experimenta una rotación significativa debido al efecto de NPR, lo cual permite alcanzar una transmisión máxima si se alinea con el polarizador. Específicamente, para esta configuración es posible deducir analíticamente una función de transmisión; el desarrollo completo se reporta en [4], y la expresión resultante está dada por:

$$T = \frac{1}{2} + u\,v\cos\big(2(\psi + r + \alpha)\big), \qquad (5)$$

donde u y v son parámetros normalizados ($u^2 + v^2 = 1$) que definen el estado de polarización, ψ representa la orientación inicial del estado de polarización con respecto al eje horizontal, α es la orientación del polarizador lineal y $r = -1/3\,(\gamma|A_0|^2 L S_3)$ es la rotación de la elipse de polarización conducida por el efecto de NPR, $|A_0|^2$ es el perfil de intensidad del pulso y $S_3 = u^2 - v^2$ es el tercer parámetro de Stokes (grado de polarización circular).

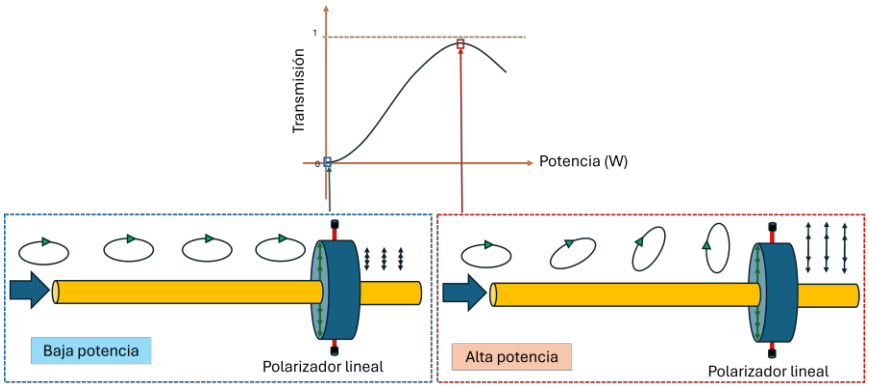


Figura 3. Efecto de absorbedor saturable debido a la transmisión no lineal de un polarizador bajo el efecto de rotación de polarización no lineal.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA OPERACIÓN DEL LÁSER DE FIBRA DE AMARRE DE MODOS PASIVO

La simulación numérica se basa en una configuración de un láser de fibra de amarre de modos pasivo, representada en la Fig. 4.a, la cual se compone de una secuencia de elementos distribuidos a lo largo de un anillo de 20 metros de fibra óptica. En principio, a nivel experimental esta cavidad de anillo comienza a operar cuando el bombeo supera el umbral y la ganancia introducida por la fibra dopada con erbio compensa las pérdidas de la cavidad, esta últimas introducidas por el acoplador de salida, conectores, elementos del controlador de polarización y otros elementos pasivos. A partir de este punto, la operación pulsada de la cavidad se alcanza bajo la operación del mecanismo de absorbedor saturable artificial, introducido a partir de la transmisión no lineal de un polarizador conducida por el efecto de NPR, así como efectos lineales y no lineales introducidos por la fibra óptica que compone las diferentes secciones de la cavidad. Así mismo, en esta configuración se introduce un aislador óptico para asegurar la operación unidireccional de la cavidad.

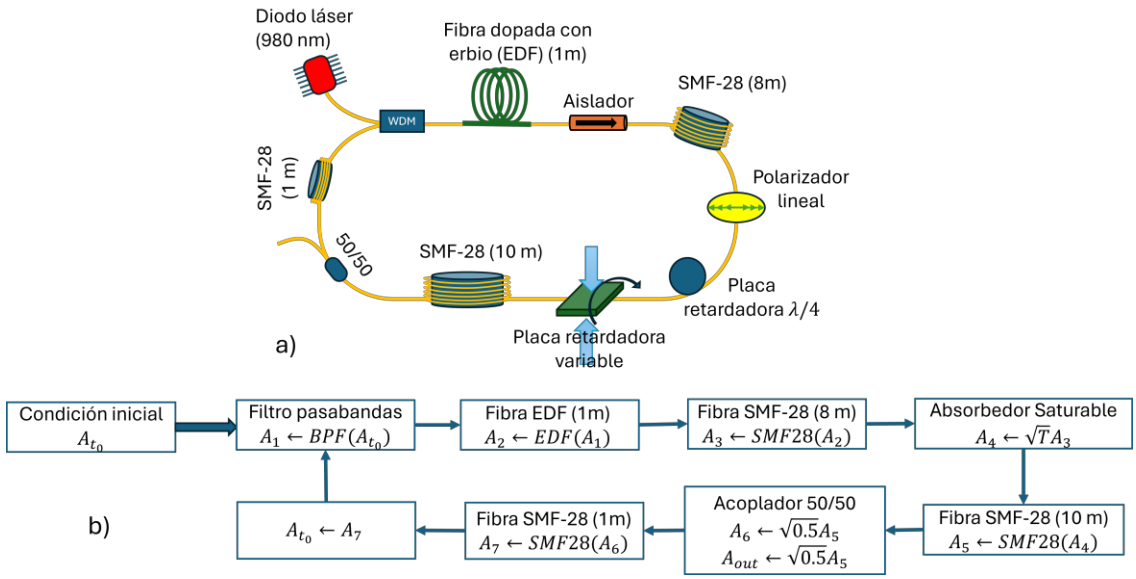


Figura 4. Láser de fibra de amarre de modos pasivo de cavidad de anillo. a) Esquema del arreglo experimental. b) Secuencia iterativa de los diferentes elementos y segmentos de fibra a desarrollar en la simulación.

En particular, a nivel experimental la etapa de amplificación está conformada por el bombeo óptico (diodo láser) y el medio activo (fibra dopada), mientras que en la simulación numérica esta etapa se introduce mediante la implementación de un filtro espectral pasabandas y la propagación de la señal en 1 m de fibra dopada con erbio (EDF, por sus siglas en ingles erbium doped fiber) modelada por la NLSE (Ec. 1). Mientras que, el efecto de absorbedor saturable artificial se introduce a partir de la implementación de una función no lineal de transmisión (Ec. 5). Adicionalmente, los efectos lineales y no lineales se introducen al simular la propagación de la señal por diferentes segmentos de fibra estándar SMF-28 a partir de la integración numérica de la NLSE (Ec. 1, despreciando la ganancia $\boldsymbol{g = 0}$).

La idea central de algoritmo consiste en propagar cíclicamente una condición inicial, semilla, definida por componentes de baja intensidad de ruido Gaussiano, a través de cada uno de los elementos que conforman a la cavidad, siguiendo la secuencia mostrada en la Fig. 4.b. Para reproducir este algoritmo numérico es necesario utilizar una plataforma computacional adecuada que permita implementar de forma eficiente la transformada rápida de Fourier, tales como MATLAB, GNU Octave, Python, entre otras.

Bajo el algoritmo presentado en la Fig. 5, en una primera fase se introducen los parámetros de entrada, así como la condición inicial del perfil temporal del pulso ($\boldsymbol{A_{t0}}$), el cual consiste en la combinación de un perfil sech^2 y componentes de ruido Gaussiano. Posteriormente, se define el ventaneo temporal y espectral, cuyo arreglo de puntos discretos se aprecian e el diagrama (Fig. #). Consecutivamente, se establece el número de ciclos a simular ($\boldsymbol{N}$) y un contador de los ciclos ($\boldsymbol{k}$), iniciando en $\boldsymbol{k = 1}$. Después, se procede a simular la propagación cíclica del perfil temporal $\boldsymbol{A_{t0}}$ a lo largo de cada uno de los segmentos del láser; en una primera fase, se aplica el filtro pasabandas (BPF, por sus siglas en inglés *"band pass filter"*), obteniendo un perfil $\boldsymbol{A_1}$, tal como se especifica en el diagrama; en una segunda fase, el perfil $\boldsymbol{A_1}$ se introduce en la etapa de amplificación, la cual consiste en propagar este perfil a lo largo de 1 m de fibra EDF, alcanzando un perfil $\boldsymbol{A_2}$ a la salida; en una tercera fase, el perfil $\boldsymbol{A_2}$ se propaga en un primer segmento de fibra SMF-28 de 8 m, obteniendo un perfil $\boldsymbol{A_3}$; en una cuarta fase, el perfil $\boldsymbol{A_3}$ entra en la etapa del absorbedor saturable, lo cual implica transmitir dicho perfil utilizando el modelo de transmisión escalar (Ec. 5), adquiriendo un perfil $\boldsymbol{A_4 = \sqrt{T}\, A_3}$; en una quinta fase, el perfil $\boldsymbol{A_4}$ se propaga por un segundo segmento de fibra SMF-28 de 10 m, obteniendo un perfil $\boldsymbol{A_5}$; en una sexta fase, el perfil $\boldsymbol{A_5}$ se transmite por un acoplador 50/50, lo cual implica reintroducir el 50% de la señal hacia la cavidad ($\boldsymbol{A_6 = \sqrt{0.5}A_5}$),

mientras que el otro 50% se transmite hacia la salida del láser ($\boldsymbol{A_{out} = \sqrt{0.5}A_5}$), este último se guarda un una matriz solución $\boldsymbol{A_T}$, la cual contendrá las soluciones del perfil a cada ciclo simulado; finalmente, en una séptima fase, el perfil $\boldsymbol{A_6}$ se propaga a lo largo de 1 m de fibra SMF-28, obteniendo un perfil $\boldsymbol{A_7}$. Como resultado, el perfil $\boldsymbol{A_7}$ se vuelve a reintroducir por las 7 fases de la cavidad como la semilla $\boldsymbol{A_{t0} = A_7}$, así mismo el contador de ciclos se incrementa en uno ($\boldsymbol{k = k + 1}$); el proceso se ejecuta cíclicamente hasta que el contador registre el número total de ciclos a simular ($\boldsymbol{k = N}$).

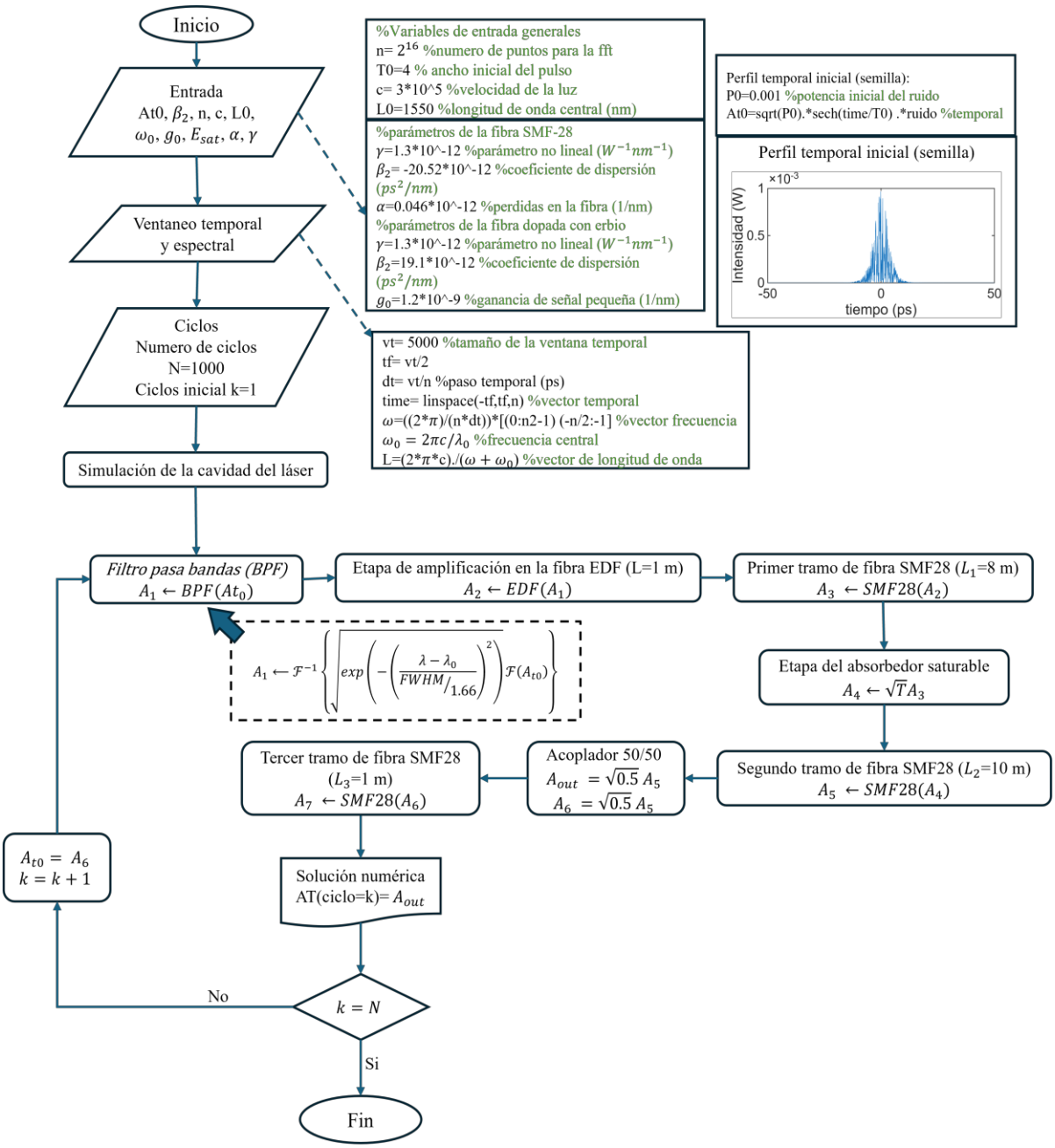


Figura 5. Diagrama del algoritmo utilizado para simular el láser de fibra de amarre de modos pasivo.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación numérica del láser de fibra dopada con erbio de amarre de modos pasivo, donde el mecanismo de absorbedor saturable se introduce a partir de la función de transmisión dependiente de la intensidad definida en la Ec. 5,

ajustando los ángulos $\boldsymbol{\psi}$ y $\boldsymbol{\alpha}$, así como el estado de polarización con los parámetros $(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{v})$. Cabe destacar que este ajuste describe únicamente una tendencia global de la función de transmisión efectiva, sin modelar de manera explícita las componentes de polarización del perfil temporal del pulso "$\boldsymbol{A}$".

A continuación, se presentan dos regímenes de pulsos obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas mediante el algoritmo descrito en la sección anterior.

Caso 1: Pulso de ruido ($S_3 = 0.1,\ \chi = 135°, \alpha = 90°$).

Se propuso la operación de la cavidad bajo un estado de polarización elíptico con baja elipticidad (A_C=0.1) y una orientación de χ= 135° con respecto a la horizontal, lo cual genera una transmisión moderada en el mecanismo del absorbedor saturable, alcanzando una transmisión $\boldsymbol{T}\sim\mathbf{0.5}$ a bajas potencias.

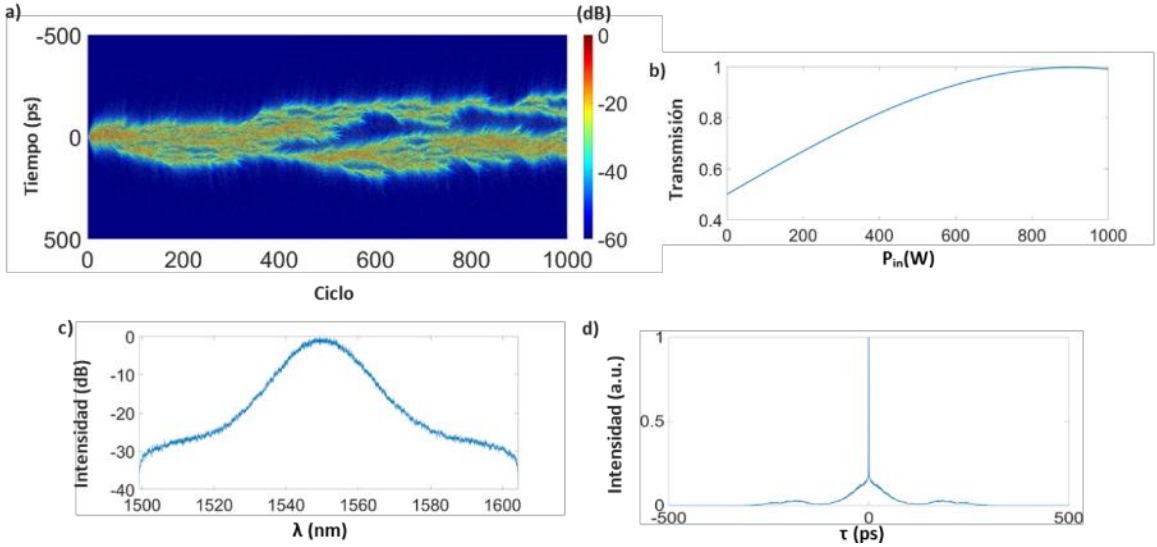


Figura 6. régimen de pulso de ruido. a) Evolución del perfil temporal a lo largo de 1000 ciclos de operación de la cavidad. b) Curva de transmisión del polarizador lineal operando como un absorbedor saturable. c) Perfil espectral promedio. d) Curva de autocorrelación.

La Fig. 6(a) muestra cómo es que a partir de una condición inicial ruidosa emergen múltiples subpulsos durante los primeros ciclos. Particularmente, la ganancia y el AS permiten que solo sobrevivan aquellos picos que alcanzan suficiente intensidad. A partir del ciclo 150, se alcanza una fase cuasi-estacionaria en la que los subpulsos no colapsan en un único paquete, sino que forman paquetes con trayectorias que se fusionan, estos paquetes son el resultado de interacciones no lineales débiles dando lugar a un patrón con un aspecto arborescente. La Fig. 6(b) muestra la curva de transmisión como función de la potencia óptica de entrada, en donde se exhibe un crecimiento progresivo hasta alcanzar la saturación, lo que estabiliza parcialmente la energía intracavidad y permite la persistencia de los subpulsos más intensos. A su vez, el espectro promedio ilustrado en la Fig. 6(c) presenta una envolvente suavizada en la que refleja la supresión de modulaciones finas causadas por variaciones de fase y separación entre subpulsos. Finalmente, la función de autocorrelación, ilustrada en la Fig. 6(d) muestra un pico central estrecho (~1.5 ps), indicativo de la duración estimada de los subpulsos, sobre un pedestal amplio y débil. La presencia de múltiples subpulsos con separaciones variables y fases no completamente coherentes contribuye a esta estructura y estos reflejan la coherencia parcial del conjunto y la envolvente dinámica del régimen.

Caso 2: Régimen estable de una molécula de solitones ($S_3 = 0.7, \chi = 110°, \alpha = 90°$).
En un último caso, modificando los ajustes en polarización ($S_3 = 0.7, \chi = 110°$), se valida una dinámica donde el sistema alcanza un régimen estable, representativo de una molécula de solitones. Este caso se tiene un régimen de molécula de solitones, donde tanto la energía, como la separación

temporal entre los solitones, se mantiene cuasi-estable gracias al equilibrio entre la dispersión, no linealidad, perdidas y ganancia en la cavidad, incluyendo también la contribución del AS.
En la Fig. 7(a), la evolución temporal revela solitones agrupados que prevalecen a cada ciclo en la cavidad, alcanzando trayectorias cuasi-paralales entre sí. La evolución del perfil espectral (Fig. 7(b)) muestra una evolución espectral con bandas laterales de Kelly, las cuales evidencian una periodicidad coherente en la cavidad y la existencia de solitones disipativos. En la Fig. 7(c), el espectro promedio exhibe claramente las modulaciones de las bandas laterales de Kelly, confirmando la correlación de fase entre los pulsos de la molécula. Para la autocorrelación mostrada en la Fig. 7(d) se observan picos regulares y simétricos que indican la separación constante entre los solitones, comportamiento típico de una molécula estable. Finalmente, la curva de transmisión (Fig. 7(e)) presenta una dependencia periódica con la intensidad óptica, solo aquellas componentes del pulso que operan dentro del primer lóbulo de transmisión experimentan un comportamiento equivalente al de un absorbedor saturable efectivo. En contraparte, las componentes que alcanzan intensidades mayores son progresivamente atenuadas al ingresar en regiones de menor transmisión, lo que conduce a la auto-estabilización temporal y espectral del pulso en la cavidad. Como resultado, este caso representa una configuración estable y coherente del láser.

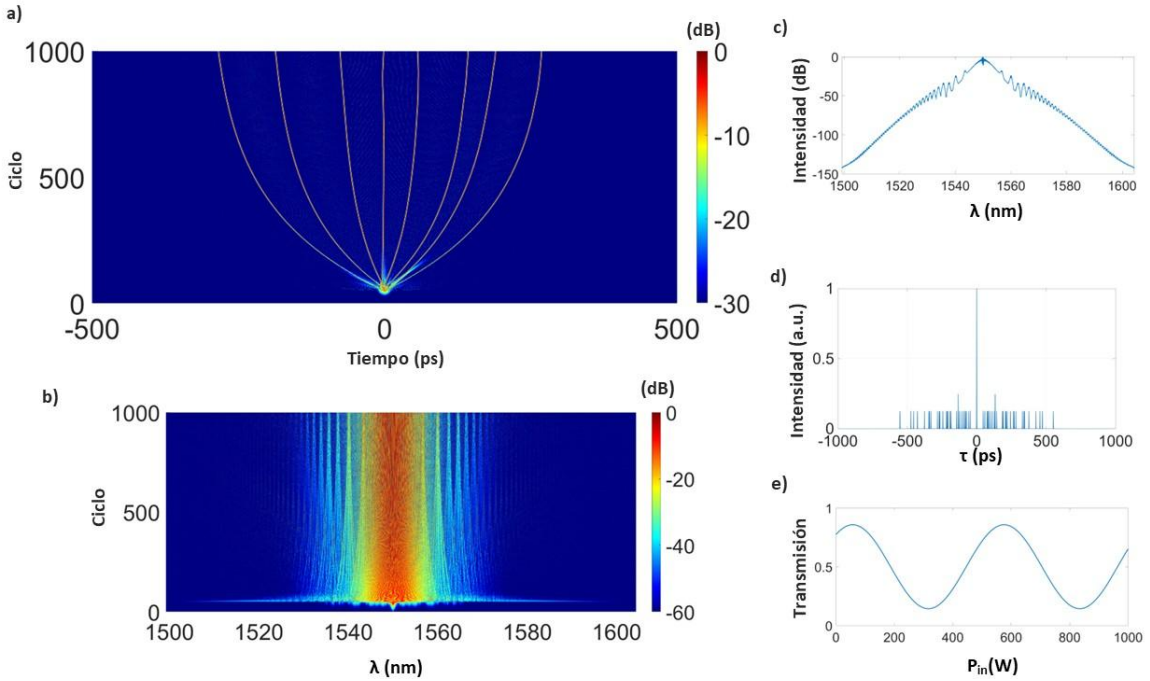


Figura 7. Régimen de molécula de múltiples solitones. Evolución de los perfiles a) temporal y b) espectral a lo largo de 1000 ciclos en la cavidad. c) Perfil espectral promedio. d) curva de autocorrelación. e) Curva de transmisión del polarizador lineal operando como un absorbedor saturable.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se presentó un modelo de simulación numérica para validar y analizar la formación y la generación de pulsos múltiples en un láser de fibra dopada con erbio de amarre de menos pasivo. En particular, la evolución cíclica de la señal a lo largo de cada uno de los segmentos que componen a la cavidad se modeló a partir de una versión escalar de la NLSE, la cual se resolvió bajo la implementación del método S-SSFM. Como resultado, fue posible simular los diferentes elementos y mecanismos de operación implícitos en el láser, incluyendo efectos lineales y no lineales en la fibra. Adicionalmente, un aspecto sustancial de la propuesta del modelo de simulación es la representación del mecanismo de absorbedor saturable mediante una función de transmisión escalar, la cual introduce una respuesta no lineal en transmisión asociada a un polarizador que transmite componentes ópticas del pulso sujetas al efecto de rotación de polarización

no lineal (NPR). Esta aproximación permite introducir de forma efectiva el comportamiento de amarre de modos pasivo en un esquema de simulación escalar, en el cual, si bien el mecanismo físico subyacente se origina en efectos de polarización, no se incluyen explícitamente las componentes de polarización del pulso. Específicamente, bajo el esquema numérico propuesto fue posible validar la generación de un régimen de pulso de ruido, así como un régimen de molécula de solitones, los cuales son consistentes con los tipos de pulsos comúnmente generados en este tipo de láseres. En conjunto, este modelo escalar de simulación numérica de un láser de fibra de marre de modos pasivo es un avance significativo para el análisis de la operación de estos dispositivos sin demandar un costo computacional significativo.

BIBLIOGRAFÍA

1. H. E. Ibarra Villalón, O. Pottiez and A. Gomez Vieyra, “El camino hacia la luz láser,” *Rev. Mex. Fis. E*, vol. 64, no. 2, pp. 100-107, July 2018, doi: 10.31349/RevMexFisE.64.100.
2. V. Ter-Mikirtychev, “*Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers”* (Springer Series in Optical Sciences 181), 2nd ed. Cham: Springer, 2019.
3. G. P. Agrawal, *Applications of nonlinear fiber optics,* 2nd ed. New York, NY, USA: Academic Press, 2008.
4. H. E. Ibarra Villalón, O. Pottiez, Y. E. Bracamontes Rodriguez, J. P. Lauterio-Cruz and A. Gomez Vieyra, “Principles of operation of a passively mode-locked fiber ring laser and 3D mapping of ultra-short pulses,” *Rev. Mex. Fis. E.*, vol. 64, no. 2, pp. 193-204, July 2018, doi: 10.31349/RevMexFisE.64.195.
5. Yamashita, S., & Set, S. Y., “Advances and challenges of mode- locked fiber lasers. *Opt. Commun.,*” vol. 578, 131406, April 2025, doi: 10.1016/j.optcom.2024.131406
6. R. I. Woodward, M. R. Majewski, S. D. Jackson; Mode-locked dysprosium fiber laser: Picosecond pulse generation from 2.97 to 3.30 μm. *APL Photonics*, vol. 3, no. 11, 116106, Nov. 2018, doi: 10.1063/1.5045799
7. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 6th ed. New York, USA: Academic Press, 2019.
8. Y. Han, Y. Guo, B. Gao, C. Ma, R. Zhang and H. Zhang, “Generation, optimization, and application of ultrashort femtosecond pulse in mode-locked fiber lasers,” *Prog. Quant. Electron.*, vol. 71, 100264, May 2020, doi: 10.1016/j.pquantelec.2020.100264.
9. J. Kang, P. Feng, X. Wei, E. Y. Lam, K. K. Tsia and K. K. Y. Wong, "102-nm, 44.5-MHz inertial-free swept source by mode-locked fiber laser and time stretch technique for optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol. 26, no. 4, pp. 4370-4381, Feb. 2018, doi: 10.1364/OE.26.004370.
10. G. Hu, T. Mizuguchi, X. Zhao, T. Minamikawa. T. Mizuno, Y. Yang, C. Li, M. Bai, Z. Zheng and T. Yasui, “Measurement of absolute frequency of continuous-wave terahertz radiation in real time using a free-running, dual-wavelength mode-locked, erbium-doped fibre laser,” *Sci. Rep.*, vol. 7, 42082, Feb. 2017, doi: 10.1038/srep42082.
11. S. Mehravar, R. A. Norwood, N. Peyghambarian and K. Kieu, “Real-time dual-comb spectroscopy with a free-running bidirectionally mode-locked fiber laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 23, June 2016, Art. no. 231104, doi: 10.1063/1.4953400.
12. G. Yi-Xuan, L. Xiao-Hui, G. Peng-lai and Z. Hai-rong, "Supercontinuum generation in an Er-doped figure-eight passively mode-locked fiber laser," *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, pp. 9893-9900, April 2018, doi: 10.1364/OE.26.009893
13. H. E. Ibarra-Villalon, O. Pottiez, A Gómez-Vieyra, and J. P. Lauterio-Cruz, and Y. E. Bracamontes-Rodriguez, “Numerical approaches for solving the nonlinear Schrödinger equation in the nonlinear fiber optics formalism,” *J. Opt.*, vol. 22, no. 4, 043501, Feb. 2020, doi: 10.1088/2040-8986/ab739e

MICRODATOS, JSON-LD, RDFA: ESTADISTICAS DE SU USO POR WEB DATA COMMONS

Ma. Susana Flores Alarcón, Silvana M. Flores Barajas, Claudia J. Torrero Flores, Lina E. Arias Hernández, Lamia Hamdan Medina, Ana Lilia Urbina Amador

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de La Laguna.
msfloresa@lalaguna.tecnm.mx.

RESUMEN

La Web es de reciente invención, sin embargo, ha tenido una influencia decisiva en todos los ámbitos de la actividad humana. Surge en 1991 para intercambiar información entre científicos de universidades de todo el mundo, alojando su primer servidor en una computadora NeXT. Su impacto es innegable, ha permitido el acceso a todo el mundo al conocimiento, ha modificado la forma de realizar el comercio, ha creado nuevas formas de socializar, ha modificado la forma de hacer política, pero también ha generado algunos retos que se deben de solucionar como la brecha digital, las noticias falsas, la ética entre otras. Internet Live Stat reportaba en 2016 más de 1500 millones de sitios Web, sin embargo, la cifra de sitios Web estables rondó los 170 millones. En 2024 el Banco Mundial reporta más de 130 millones de servidores seguros y en la misma fecha más del 70% de usuarios en el mundo que usan Internet.

En 2008 el SEO Semántico empieza a utilizarse con mayor frecuencia. El SEO Semántico surge para proporcionar un medio a los gestores de contenido y a los programas buscadores de Internet para mejorar la visibilidad de los sitios Web, así como de ajustarse con mayor precisión a las intenciones de búsqueda de los internautas, para ello, utiliza datos estructurados, código que se inserta en las páginas Web para describir secciones de ella que permitirán que los buscadores proporcionen información más ajustada a la solicitada por el usuario. Para realizar esto el gestor de contenidos utiliza RDFa, Microdatos, JSON-LD o Microformatos. Estos formatos no se encuentran incorporados en la actualidad en todos los sitios. La Universidad de Mannheim mantiene el proyecto Web Data Commons. El proyecto periódicamente explora los sitios Web y extrae información para formar el corpus Web más grande de dominio público, el cual puede ser explorado por investigadores y compañías. Del corpus la universidad extrae información para proporcionar estadísticas de los diferentes formatos usados de datos estructurados, así como de los vocabularios que se utilizan. De la información extraída, en el 2024 se encontró que un 50% de los sitios Web incorporan algún tipo de datos estructurados. En estos sitios Web el formato más utilizado fue JSON-LD, seguido por los Microdatos, hcard y RDFa.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes y evolución de la web

A finales de la década de los 80's del siglo pasado Tim Berners Lee trabaja en la elaboración de un sistema que permitiera intercambiar documentos a los investigadores del CERN e investigadores de universidades locales y de otras partes del mundo de forma automática. Presentó los estándares de la Web, estableciendo los principios de la interoperabilidad, el acceso universal y el hipertexto. Utilizó una computadora NeXT para alojar el primer servidor y sitio Web. En 1991 el mundo contaba con el primer servidor alojando un sitio Web **[1]**. Han trascurrido tres décadas y el crecimiento de servidores y sitios Web ha sido muy importante. Internet Live Stats reporta la existencia de cerca de 1,500 millones de sitios Web e indica que muchos de ellos se encuentran inactivos. Los datos que reporta el Banco mundial al 2024 son de más de 133 millones de servidores seguros de Internet, además de tener la estimación de más del 70% por ciento de usuarios en el mundo **[2] [3] [4]**. El crecimiento de la Web ha generado retos para los internautas, así como para los motores de búsqueda de Internet.

TEORÍA

El Concepto de SEO Semántico

En la búsqueda que realizan Lopezosa y Codina en 2018, encontraron que en 2012, el concepto de SEO Semántico adquiere su real peso, ya que desde 2010 Doszkocs indica que los motores de búsqueda, son capaces de realizar búsquedas en base en conceptos, aunque estos no coincidan con las palabras clave introducidas por el usuario, en 2012 Briggs retoma a Doszkocs, dice que los motores de búsqueda ofrecen resultados adecuados tomando en cuenta entidades, lo mismo se expresa en el blog Mashable, el cual indica que los motores de búsqueda ofrecen resultados en base a la intención de búsqueda de los usuarios. En 2017 Well Yu lo define como una estrategia para optimizar la intención de búsqueda de los usuarios incorporando en los resultados datos enriquecidos y en 2017 Schubert hace alusión al etiquetado web o marcado semántico para que los motores de búsqueda fueran capaces de entender el contenido y presentarlo en los resultados de búsqueda como datos enriquecidos **[5]**.

Datos Estructurados y Grafos de Conocimiento

Existen varias tecnologías utilizadas en la búsqueda semántica, entre ellas se encuentran los datos estructurados. Son metadatos en las páginas web, dirigidos a su procesamiento automático. Ellos describen el contenido de la página web a programas que buscan en paginas para obtener información e indexarla en una base de datos. Es información que no es visible para las personas, sin embargo, para los robots si lo son. Al insertar código con sintaxis de datos estructurados, se da información a los buscadores en forma de conceptos y significados y no solo en palabras clave. Ello permite que al agregar contenido semántico se pueda llegar a interpretar el contenido y que la búsqueda no quede simplemente en una equiparación de las palabras. Ello genera que se proporcionen resultados más certeros en relación a la búsqueda solicitada. En conjunto con los datos estructurados el SEO Semántico se apoya en el grafo de conocimiento para asociar hechos, lugares, personas, cosas, para interconectarlos y proporcionar resultados de búsqueda más completos. Los datos estructurados se pueden encontrar como metadatos en las páginas web, de esta manera se describe el contenido del sitio web a los motores de búsqueda o agregando código al contenido, para entregar resultados enriquecidos **[6]**.

Formatos de Anotación y Sintaxis

Microdatos. Los microdatos se incorporan como atributos en etiquetas de HTML5. Consiste de un grupo de propiedades nombre-valor que se incorpora en las etiquetas de HTML. Los atributos *Itemscope, Itemtype e itemprop*, permiten describir cosas, personas, lugares. A continuación, se presenta un ejemplo para describir una persona **[7] [8]**. Los ejemplos fueron elaborados con la ayuda de ChatGPT **[9].**

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="es">
<head>
   <meta charset="UTF-8">
   <title>Perfil de Persona</title>
</head>
<body>
<div itemscope itemtype="https://schema.org/Person">
     <h1 itemprop="name">María López García</h1>
     <img src="maria-lopez.jpg" alt="Foto de María López" itemprop="image" width="200">
   <p>
      <strong>Profesión:</strong>
      <span itemprop="jobTitle">Desarrolladora Web</span>
   </p>
   <p>
      <strong>Empresa:</strong>
      <span itemprop="worksFor" itemscope itemtype="https://schema.org/Organization">
         <span itemprop="name">Innovación Digital S.A.</span>
```

```
      </span>
    </p>
    <p>
      <strong>Correo electrónico:</strong>
      <a href="mailto:maria.lopez@email.com" itemprop="email">
        maria.lopez@email.com
      </a>
    </p>
    <p>
      <strong>Teléfono:</strong>
      <span itemprop="telephone">+34 600 123 456</span>
    </p>
    <p>
      <strong>Fecha de nacimiento:</strong>
      <time itemprop="birthDate" datetime="1990-05-15">
        15 de mayo de 1990
      </time>
    </p>
    <p>
      <strong>Perfil de LinkedIn:</strong>
      <a href="https://www.linkedin.com/in/marialopez" itemprop="sameAs">
        linkedin.com/in/marialopez
      </a>
    </p>
  </div>
  </body>
  </html>
```

RDFa (Resource Description Framework in Attributes). Compuesto por los estándares RDFa-Lite y RDFa-core, este formato define las reglas de procesamiento para estructurar datos a través de atributos específicos del lenguaje web, extendiendo las capacidades nativas de la página.

```
<body vocab="https://schema.org/" typeof="Person">
<h1 property="name">María López García</h1>
<p><strong>Profesión:</strong> <span property="jobTitle">Desarrolladora Web</span></p>
<p typeof="Organization" property="worksFor">
<strong>Empresa:</strong> <span property="name">Innovación Digital S.A.</span></p>
</body>
```

JSON-LD (JavaScript Object Notation for Linked Data). Formato de anotación recomendado por Google que se implementa de manera independiente al bloque HTML visible mediante un script de JavaScript. Esta metodología otorga una mayor legibilidad y mantenibilidad al código, ofreciendo soporte nativo para las características de datos enlazados (Linked Data).

```
<script type="application/ld+json">
{
"@context": "https://schema.org",
"@type": "Person",
"name": "María López García",
"jobTitle": "Desarrolladora Web",
"worksFor": {
"@type": "Organization",
"name": "Innovación Digital S.A."
}
}
</script>
```

Vocabulario Schema.org. Actúa como un marco de referencia y vocabulario global unificado que da soporte a los formatos descritos anteriormente, definiendo de forma consensuada las clases, propiedades y acciones necesarias para que las máquinas interpreten el contenido de la red **[11]**.

PARTE EXPERIMENTAL

La evaluación empírica del uso de datos estructurados a nivel global se realizó utilizando el corpus estructurado por el proyecto Web Data Commons, auspiciado por la Universidad de Mannheim. Este proyecto metodológico extrae información de forma semestral a partir del repositorio público provisto por Common Crawl, una organización sin fines de lucro que ejecuta rastreos masivos y periódicos de la infraestructura web global.
Para efectos de esta investigación, se analizaron los microdatos y registros estadísticos consolidados correspondientes al reporte del segundo semestre de 2024 (octubre de 2024). La dimensión técnica del volumen de datos procesados en dicho experimento se detalla estructuradamente en la Tabla 1 **[10]**.

Tabla 10 Estadísticas de la extracción (tomado de Web Data Commons)

Métrica de Extracción (Crawl Metric)	Valor Cuantitativo Registrado
Fecha del Rastreo (Crawl Date)	Octubre de 2024
Volumen Total de Datos (Comprimidos)	77.33 Terabytes
URLs HTML Procesadas (Parsed HTML URLs)	2,391,039,772
URLs con Presencia de Triples (URLs with Triples)	1,245,622,627
Dominios Totales en el Rastreo (Domains in Crawl)	37,447,141
Dominios con Presencia de Triples	16,525,070
Entidades Tipificadas (Typed Entities)	15,647,463,083
Volumen de Triples Extraídos	73,993,669,093
Tamaño de Datos Extraídos (Comprimidos)	1.4 Terabytes

RESULTADOS

Análisis de Adopción y Evolución Temporal

Los resultados derivados de la extracción de Web Data Commons indican que, al cierre de 2024, el 50% de los sitios web analizados han adoptado e incorporado algún formato de datos estructurados en su arquitectura de código fuente.

El análisis histórico de la densidad de triples distribuidos entre los cuatro formatos de marcado más populares revela un cambio de paradigma técnico:

- **Periodo 2012 – 2020.** Se observa un predominio absoluto y sostenido del formato Microdatos como la principal opción de marcado semántico en la web.
- **Periodo 2021 – Presente.** El formato JSON-LD, cuya aparición estadística relevante data de 2016, experimentó un crecimiento muy fuerte que consolidó su dominio absoluto en el mercado actual, alineándose de forma directa con las directrices y recomendaciones de los principales motores de búsqueda como Google.
- **Formatos Secundarios.** A pesar del desplazamiento, los Microdatos retienen una cuota significativa de implementación en plataformas heredadas u optimizadas bajo criterios estables. Por su parte, la especificación hCard mantiene un uso marginal y decreciente, mientras que RDFa, aun contando con el respaldo institucional del World Wide Web Consortium (W3C), muestra una adopción estadísticamente estancada que no ha logrado despegar en el entorno comercial. (Figura 1).

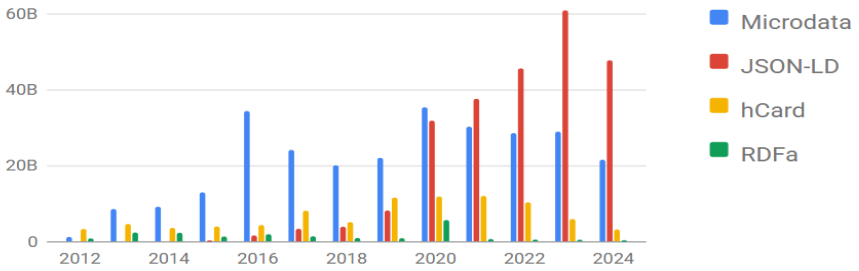


Figura 1 Número de triples incorporados en sitios web de los cuatro formatos mas populares (tomada de Web Data Commons)

CONCLUSIONES

El crecimiento masivo de dominios y servidores en la Web contemporánea exige respuestas tecnológicas avanzadas para garantizar la eficiencia de los procesos de indexación de los motores de búsqueda. Los datos estructurados, operados primordialmente bajo el estándar JSON-LD y el vocabulario unificado de Schema.org, representan la solución técnica predominante y más eficaz para resolver las ambigüedades de la información en la red, facilitando que los sistemas automáticos interpreten con precisión la intención de búsqueda global del usuario.

BIBLIOGRAFÍA

1. CERN, “CERN Acelerating Science“, 2026. [En línea]. Available: https://home.cern/science/computing/birth-web/short-history-web.
2. Grupo Banco Mundial, “Servidores de Internet Seguros“, 2024. [En línea]. Available: https://datos.bancomundial.org/indicador/IT.NET.SECR.
3. Internet Live Stats, “Total Number of Websites“, 2016. [En línea]. Available: https://www.onemarketer.net/es/historia-e-impacto-de-internet-en-el-mundo/.
4. Grupo Banco Mundial, “Individuos que utilizan Internet (% de la población) “, 2024. [En línea]. Available: https://datos.bancomundial.org/indicator/IT.NET.USER.ZS.
5. C. Lopezsosa García y L. Codina Bonilla, “Seo semántico y web móvil optimización de contenidos digitales en cibermedios: “, de *X Congreso Internacional de Ciberperiodismo*, Bilbao, España, 2018.
6. C. Lopezosa, L. Codina y V. Herrero Solana, “SEO Semántico: conceptualización e implementación en sitios intensivos en contenico“, *DigiDoc,* pp. 1-51, 2022.
7. R. Jangra, A. Shashikumara y P. Kikon, “Metadata Standards for Content Description: Microdata, and JSON-LD“, Central University of Gujarat, 2018.
8. A. Trautsch, “Semantic Annotations in Today’s Web“, 07, 18, 2016.
9. ChatGPT, “ChatGPT“, 2026. [En línea]. Available: https://chatgpt.com/es-419/. [Último acceso: 2026].
10. University of Mannheim, “Web Data Commons“, 2024. [En línea]. Available: https://webdatacommons.org/. [Último acceso: 2024].
11. Schema, “Schema“, 2026. [En línea]. Available: https://schema.org/. [Último acceso: 2026].

SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DEL SrSb2O6 DOPADO CON ITRIO

Gael Mejía Cordova[1], Jacob Morales Bautista[1], Héctor Guillén Bonilla[1], Alex Guillén Bonilla[2], José Trinidad Guillen Bonilla[1], Verónica-María Rodríguez-Betancourtt[1].

[1]Universidad de Guadalajara-Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías
[2]Universidad de Guadalajara-Centro Universitario de los Valles
alex.guillen@academicos.udg.mx

RESUMEN

En esta investigación se llevó a cabo la síntesis de polvos de antimoniato de estroncio ($SrSb_2O_6$) dopado con itrio mediante un método de química húmeda asistido por microondas. Para la síntesis, se prepararon de manera independiente soluciones de cloruro de antimonio, nitrato de estroncio y etilendiamina, utilizando etanol como disolvente en todos los casos. Cada solución se sometió a agitación magnética durante 10 minutos, posteriormente, las soluciones se mezclaron hasta obtener una mezcla homogénea. En la síntesis de las muestras dopadas se añadió nitrato de itrio como precursor dopante (5 % molar respecto al sitio de Sr), con el objetivo de favorecer la sustitución parcial de Sr^{+2} por Y^{3+}, manteniendo la agitación para asegurar su incorporación homogénea. La caracterización estructural se realizó mediante difracción de rayos X (XRD), los patrones de difracción revelaron la obtención de la fase trirutilo $SrSb_2O_6$, mientras que el patrón obtenido de la muestra dopada mostró un ligero desplazamiento de los picos, lo cual podría estar asociado con la incorporación de iones Y^{3+} en la red cristalina. El análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló que, tanto en la muestra pura como en la dopada, la superficie está compuesta por microplaquetas. La espectroscopia de UV-VIS revelo que el material, presenta un valor de band gap de aproximadamente 3.73 eV, mientras que el material dopado con itrio muestra un valor ligeramente diferente de 3.95 eV, ambos valores dentro de los reportado en la literatura. La actividad fotocatalítica del $SrSb_2O_6$ se evaluó mediante la decoloración de verde malaquita y rodamina B utilizando radiación UV. Los hallazgos indicaron que, en 180 minutos, el material dopado mostro una degradación del 55% de verde de malaquita y un 27% de rodamina. Los resultados sugieren que el dopaje con itrio puede disminuir la tasa de recombinación de los pares fotogenerados, lo cual hace que el $SrSb_2O_6$:Y sea un material prometedor en aplicaciones fotocatalíticas.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua causada por colorantes orgánicos provenientes de la industria textil, farmacéutica y química representa uno de los principales problemas ambientales debido a su alta estabilidad química y dificultad de degradación [1]. Entre los contaminantes más comunes se encuentran los colorantes tipo trifenilmetano, como el verde de malaquita, el cual presenta elevada toxicidad y persistencia en medios acuáticos, afectando ecosistemas y organismos vivos incluso a bajas concentraciones [2]. Debido a ello, en los últimos años se han estudiado y desarrollado diversas estrategias para la remediación ambiental, destacando la fotocatálisis heterogénea basada en materiales semiconductores [3].

Los semiconductores fotocatalíticos tienen la capacidad de generar pares electrón-hueco bajo irradiación luminosa, favoreciendo la formación de especies reactivas capaces de degradar contaminantes orgánicos [4]. Tradicionalmente, materiales como TiO_2 y ZnO han sido ampliamente estudiados debido a su estabilidad química y elevada actividad fotocatalítica [5]. Sin embargo, estos materiales presentan limitaciones relacionadas con la rápida recombinación de cargas fotogeneradas y su limitada absorción espectral, lo que ha impulsado la búsqueda de nuevos materiales semiconductores con mejores propiedades estructurales y electrónicas [6].

En este contexto, los antimoniatos con estructura tipo trirutilo han despertado gran interés debido a su elevada estabilidad térmica, resistencia química y propiedades electrónicas ajustables [7]. Particularmente, el antimoniato de estroncio ($SrSb_2O_6$) ha mostrado propiedades atractivas para aplicaciones fotocatalíticas y catalíticas [8]. Además, sus propiedades pueden modificarse mediante procesos de dopaje, los cuales permiten generar defectos cristalinos y mejorar la separación de pares electrón-hueco [9]. El dopaje con tierras raras ha sido ampliamente utilizado para modificar las propiedades ópticas y electrónicas de materiales semiconductores. En particular, el itrio (Y^{3+}) puede incorporarse parcialmente en la red cristalina del $SrSb_2O_6$ debido a la similitud de su tamaño de radio iónico (0.9 Å) con el de Sr^{2+} (1.18 Å), favoreciendo la generación de defectos estructurales y posibles cambios en la respuesta fotocatalítica del material [10, 11].

Por otra parte, las propiedades de los materiales dependen considerablemente del método de síntesis empleado. En años recientes, los métodos de química húmeda asistidos por microondas han adquirido gran relevancia debido a que permiten reducir los tiempos de reacción y favorecer una nucleación homogénea, obteniendo materiales con tamaños de partícula reducidos y morfologías específicas [12]. Estas características pueden incrementar el área superficial y en consecuencia, mejorar el desempeño fotocatalítico de los materiales sintetizados [13].

En este trabajo se sintetizaron polvos de $SrSb_2O_6$ puro y dopado con itrio mediante un método de química húmeda asistido por microondas. La estructura cristalina, morfología y propiedades ópticas fueron evaluadas mediante XRD, SEM y espectroscopía UV-Vis, respectivamente. Finalmente, la actividad fotocatalítica del material se estudió mediante la degradación de verde malaquita y rodamina B bajo irradiación UV.

TEORÍA

Los antimoniatos pertenecientes a la familia de estructuras tipo trirutilo han despertado gran interés debido a sus propiedades magnéticas, ópticas y eléctricas [14]. Estas estructuras derivan del arreglo cristalino tipo rutilo y generalmente se describen mediante la fórmula empírica AB_2O_6, donde A corresponde a un catión divalente (Co, Zn, Mg, Sr) y B a un catión pentavalente (Ta, Sb) [15]. En los compuestos tipo trirutilo los cationes metálicos se encuentran rodeados por seis átomos de oxígeno, formando unidades octaédricas, estos octaedros están conectados mediante vértices y aristas, formando una red tridimensional ordenada [16].

La fotocatálisis es un proceso en el cual un material absorbe radiación con energía igual o mayor a su ancho de banda prohibida, promoviendo el salto de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, formando pares electrón hueco, los cuales pueden participar posteriormente en reacciones de oxidación y reducción que favorecen la formación de especies reactivas capaces de degradar o transformar diferentes compuestos [17]. Los huecos tienden a interactuar con moléculas de agua, favoreciendo la formación de radicales hidroxilos $(OH^{\bullet})$ mientras que los electrones pueden reaccionar con el oxígeno disuelto generando radicales superóxidos $(O_2^{-\bullet})$. Estas especies reactivas participan posteriormente en procesos de oxidación que contribuyen a la degradación de distintos compuestos, dicho mecanismo puede representarse de manera general mediante las siguientes reacciones [18]

$$SrSb_2O_6 + hv \rightarrow e^- + h^+$$

$$O_2 + e^- \rightarrow O_2^{-\bullet}$$

$$H_2O + h^+ \rightarrow OH^{\bullet}$$

Los radicales generados reaccionan posteriormente con las moléculas orgánicas promoviendo su degradación parcial o total. Sin embargo, uno de los principales factores que limita la eficiencia fotocatalítica es la recombinación de los pares electrón hueco. Debido a ello, se han implementado estrategias como el dopaje, el cual consiste en la incorporación controlada de impurezas dentro de la red cristalina de un material con el objetivo de modificar sus propiedades físicas y químicas [19]. En materiales fotocatalíticos, el dopaje con tierras raras puede inducir deformaciones en la red

cristalina y favorecer la separación de cargas, suprimiendo parcialmente la recombinación de los pares electrón-hueco y mejorando así la actividad fotocatalítica [20].

Las técnicas analíticas de caracterización se utilizan para estudiar y determinar las propiedades físicas, químicas, estructurales, morfológicas y ópticas de un material. Estas técnicas permiten obtener información relacionada con la estructura cristalina, el tamaño de partícula o cristalito, la morfología superficial, las propiedades electrónicas y ópticas, así como la distribución elemental. La información obtenida resulta fundamental para comprender el comportamiento del material y evaluar su potencial en distintas aplicaciones tecnológicas [21]. Por ejemplo, la difracción de rayos X (XRD) es una técnica analítica utilizada para identificar fases cristalinas y estudiar la estructura de materiales sólidos. Su funcionamiento se basa en la interacción de un haz de rayos X con los planos cristalinos del material. Cuando los rayos X inciden sobre una estructura cristalina, ocurre una interferencia constructiva cuando se cumplen las condiciones descritas por la ley de Bragg, generando patrones de difracción característicos de cada material. A partir de estos patrones es posible determinar información relacionada con la estructura cristalina, distancia interplanar y tamaño de cristalito [22].

Otra técnica de caracterización fundamental es la microscopia electrónica de barrido (SEM), esta técnica es utilizada para estudiar la morfología superficial y el tamaño de partículas en materiales micro y nanométricos. Su funcionamiento se basa en la interacción de un haz de electrones con la superficie de la muestra, generando señales que son detectadas para formar imágenes de alta resolución. Entre las señales más importantes se encuentran los electrones secundarios, asociados principalmente a la topografía y detalles superficiales y los electrones retrodispersados, relacionados con variaciones en la composición y contraste del material [22-23].

Por otra parte, La espectroscopía de dispersión de energía (EDS) es una técnica utilizada para realizar análisis químicos cualitativos y semicuantitativos de materiales. Generalmente se encuentra acoplada a sistemas SEM, permitiendo determinar la composición elemental de regiones específicas de la muestra mediante la detección de rayos X característicos generados por la interacción del haz de electrones con el material. Esta técnica complementa el análisis morfológico obtenido por SEM y permite identificar los elementos presentes en concentraciones detectables [24].

Las propiedades ópticas, como el ancho de banda prohibida pueden evaluarse mediante espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa (DRS), la cual es una técnica utilizada para estudiar las propiedades ópticas de materiales sólidos, especialmente en forma de polvos. Su funcionamiento se basa en la medición de la radiación reflejada difusamente por la muestra cuando esta es irradiada con luz en la región ultravioleta y visible. En materiales en forma de polvo la luz se dispersa en múltiples direcciones debido a las irregularidades superficiales y a la interacción de la radiación con las partículas del material. A partir de esta reflectancia es posible obtener información relacionada con la absorción óptica y el ancho de banda prohibida del material [25].

PARTE EXPERIMENTAL

Los polvos de $SrSb_2O_6$ puro y dopado con itrio (5 % molar de Y^{3+} en sitio de Sr^{2+}) fueron sintetizados mediante un método de química húmeda asistido por microondas. Como precursores se emplearon tricloruro de antimonio ($SbCl_3$), nitrato de estroncio ($Sr(NO_3)_2$), etilendiamina ($C_2H_8N_2$), nitrato de itrio hexahidratado ($Y(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$) y etanol grado reactivo. Para la síntesis de la muestra no dopada, se prepararon por separado tres soluciones: (i) $SbCl_3$, (ii) $Sr(NO_3)_2$ y (iii) $C_2H_8N_2$, utilizando 5 mL de etanol como disolvente en cada una. Cada solución se mantuvo bajo agitación durante 10 min a temperatura ambiente. Posteriormente, la solución de nitrato de estroncio se añadió gota a gota en la solución de etilendiamina, seguida de la incorporación de la solución de tricloruro de antimonio. La mezcla resultante se dejó bajo agitación magnética constante durante 24 h a temperatura ambiente para garantizar la homogeneización completa del sistema. Para la muestra dopada con itrio, se disolvió el nitrato de itrio correspondiente al 5 % molar respecto al contenido de estroncio en 5 mL de etanol. Esta solución se añadió lentamente a la solución de nitrato de estroncio previamente

preparada, manteniendo agitación continua, antes de proceder con la adición de etilendiamina y tricloruro de antimonio siguiendo el mismo protocolo descrito para la muestra no dopada.

La remoción del disolvente se realizó mediante irradiación por microondas en un horno doméstico operando al 20 % de su potencia máxima. Se aplicaron ciclos cortos de 5 s de irradiación, vigilando que la temperatura del medio no excediera 70 °C con el fin de evitar la ebullición violenta del etanol y la pérdida de material por derrame. El proceso se repitió hasta obtener una pasta homogénea y semiseca. Los materiales obtenidos fueron secados a 200 °C durante 5 h empleando una rampa de calentamiento de 1.6 °C/min. Posteriormente, las muestras se calcinaron a 500, 600, 700 y 800 °C durante 5 h para inducir la formación de la fase cristalina tipo trirutilo del $SrSb_2O_6$

Para evaluar las propiedades fotocatalíticas del $SrSb_2O_6$, el material fue depositado sobre sustratos de vidrio borosilicato (1x2.5 cm) mediante la técnica de spin coating. Para la preparación de la suspensión dispersante, se mezclaron 0.3 g de $SrSb_2O_6$ con 0.1 g de etilcelulosa, 5 mL de etanol, y 1ml de tolueno manteniendo la solución bajo agitación magnética a 50 °C hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, una gota de la suspensión dispersante fue colocada sobre el sustrato y distribuida mediante spin coating a 2000 rpm durante 5 s. Este procedimiento se repitió cinco veces para cada recubrimiento con el fin de incrementar la cantidad de material depositado.

Finalmente, los recubrimientos obtenidos fueron sometidos a un tratamiento térmico a 450 °C durante 2 h, con el fin de favorecer su adherencia al sustrato y mejorar su estabilidad. La actividad fotocatalítica de las muestras se evaluó mediante la degradación de soluciones acuosas de verde malaquita y rodamina B, ambas con una concentración inicial de 5 ppm. Para los ensayos fotocatalíticos, los recubrimientos se colocaron en celdas de cuarzo con 5 ml de colorante y se mantuvieron en oscuridad durante 30 min para alcanzar el equilibrio de adsorción-desorción. Posteriormente, las muestras fueron irradiadas durante 180 min utilizando una lámpara UV de 15W y una longitud de onda de 254. El proceso de degradación se monitoreó cada 30 min mediante un espectrofotómetro Thermoscientific modelo génesis 150, registrando la disminución de la absorbancia característica de cada colorante.

RESULTADOS

Análisis de la difracción de rayos X

La Figura 1 muestra los patrones de difracción de rayos X correspondientes a las muestras de $SrSb_2O_6$ tratadas térmicamente a 200, 500, 600, 700 y 800 °C, así como la nuestra dopada con itrio y calcinada a 700°C. Los difractogramas revelaron la presencia de señales asociadas a fases secundarias correspondientes a óxidos de estroncio (Sr_2O_3 y Sr_2O_2). Sin embargo, la muestra tratada a 700 °C presentó una menor intensidad relativa y menor cantidad de estas fases secundarias respecto a los picos principales de $SrSb_2O_6$, indicando el mayor grado de cristalinidad entre todas las muestras analizadas. De acuerdo con el código PDF 96-200-9658 utilizado por el software X'Pert HighScore, los polvos de $SrSb_2O_6$ corresponden a una estructura hexagonal tipo trirutilo con grupo espacial P31m y parámetros de red a = b=5.272 Å y c = 5.366 Å [26].

Por otra parte, las fases secundarias identificadas en las muestras pueden atribuirse tanto a residuos provenientes de los precursores utilizados durante el proceso de síntesis como a una reacción incompleta en la formación del antimoniato. Sin embargo, en la síntesis de materiales es común que las especies residuales se eliminen gradualmente al incrementar la temperatura de tratamiento térmico, lo que podría explicar la disminución de las fases secundarias observada a 700 °C [27].

Debido a la disminución de las fases secundarias y a la mayor formación de la fase deseada, la muestra calcinada a 700 °C fue seleccionada para realizar las caracterizaciones posteriores. Asimismo, el tamaño promedio de cristalito de la muestra calcinada a 700 °C fue estimado a partir del ensanchamiento de los picos de difracción mediante la ecuación de Scherrer, obteniéndose un valor aproximado de 40 nm, calculado a partir del promedio de los principales picos de difracción correspondientes a $SrSb_2O_6$. En la literatura se ha reportado la síntesis de $SrSb_2O_6$ principalmente

mediante el método de reacción en estado sólido, sin embargo, las temperaturas de síntesis empleadas suelen ser más elevadas, alcanzando valores de 1150 °C [28] y 1000 °C [29]. En contraste, en el presente trabajo se logró obtener $SrSb_2O_6$ a menores temperaturas mediante un método de síntesis más sencillo y relativamente económico, aunque con la presencia de algunas fases secundarias.

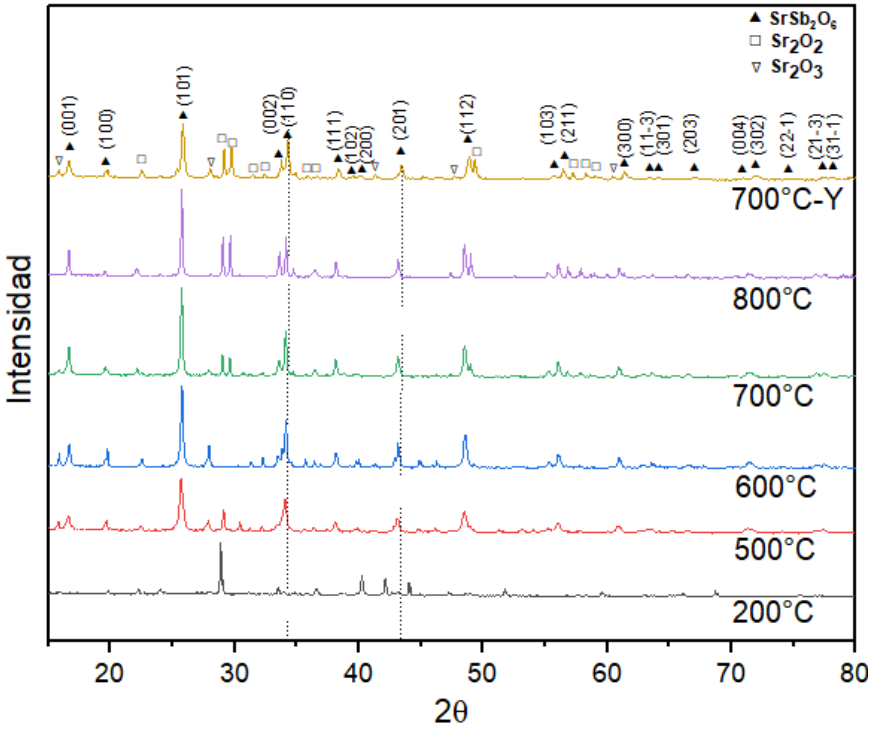


Figura 1. Difracción de rayos X de $SrSb_2O_6$ calcinado a diferentes temperaturas

El patrón denominado 700°C-Y de la Figura 1, corresponde a la muestra dopada con itrio. En dicho patrón se observó la conservación de la fase principal correspondiente al $SrSb_2O_6$, sin embargo, también se identificaron algunos picos adicionales de baja intensidad asociados a fases secundarias. La presencia de estas fases puede atribuirse a la incorporación del dopante en el sistema. De manera análoga a lo reportado en otros sistemas cristalinos dopados, el dopaje modifica el equilibrio de formación de la fase cristalina y puede favorecer la aparición de compuestos residuales o fases secundarias [30]. No obstante, la baja intensidad y reducida cantidad de estos picos sugieren que la fase predominante continúa siendo la correspondiente al $SrSb_2O_6$. Adicionalmente, se observó un ligero corrimiento en la posición de algunos picos de difracción en comparación con la muestra sin dopar, lo cual podría estar relacionado con la incorporación de los iones Y^{3+} en la red cristalina del $SrSb_2O_6$ y con posibles variaciones en los parámetros de red. Este comportamiento ha sido reportado previamente en materiales dopados, donde la sustitución iónica genera deformaciones locales en la estructura cristalina, ocasionando desplazamientos en los picos de difracción [31].

Análisis morfológico mediante SEM

La Figura 2a–d muestra las micrografías SEM de las muestras sin dopar y dopadas con itrio. El análisis morfológico de la muestra sin dopar reveló una superficie compuesta por plaquetas con aristas de aproximadamente 500 nm de longitud. Por otro lado, las muestras dopadas con itrio también presentaron una morfología tipo plaqueta, sin embargo, el tamaño de las aristas disminuyó hasta aproximadamente 200 nm. En términos generales, el dopaje no produjo cambios significativos en la morfología del material, observándose únicamente una reducción en las dimensiones de las plaquetas, lo que sugiere un adecuado control morfológico durante el proceso de síntesis. Este efecto puede atribuirse a la presencia de etilendiamina, la cual actúa como ligando bidentado,

coordinándose simultáneamente con los cationes metálicos presentes en el sistema precursor, favoreciendo así un crecimiento morfológico más controlado [32].

De acuerdo con la literatura, la morfología superficial desempeña un papel importante en el rendimiento fotocatalítico, ya que influye en parámetros como el área superficial específica y la densidad de sitios activos. En particular, las estructuras tipo plaqueta han sido asociadas con una mejora en las propiedades fotocatalíticas debido a su elevada área superficial. Por ejemplo, Min Uk Choi y Tomokatsu Hayakawa reportaron la síntesis de plaquetas hexagonales de $CuGaO_2$ en la degradación de azul de metileno [33]. De manera similar, se han reportado aglomerados de microplaquetas de Bi_2S_3 con un desempeño eficiente en la degradación fotocatalítica de azul de metileno [34]. Aunque estos materiales presentan composiciones y estructuras cristalinas diferentes, dichos antecedentes sugieren que la morfología tipo plaqueta podría contribuir favorablemente al desempeño fotocatalítico del material sintetizado.

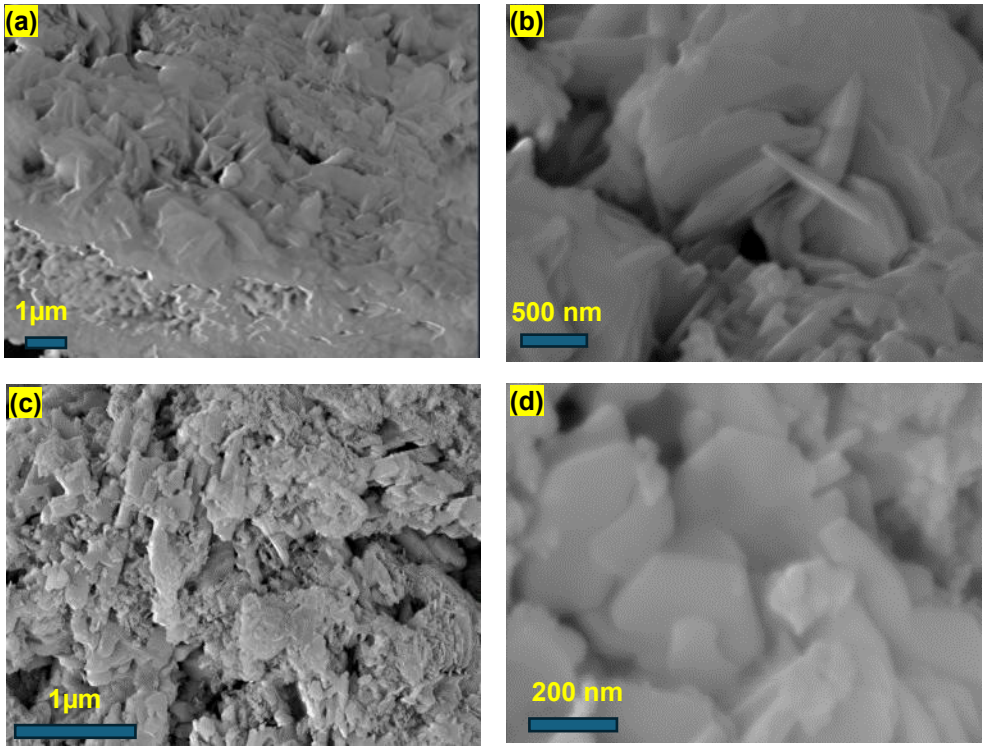


Figura 2. Micrografías SEM de los polvos de $SrSb_2O_6$ calcinados a 700°C: (a) y (b) sin dopar y (c) y (d) dopados con itrio

Análisis de la caracterización óptica mediante UV-VIS

La Figura 3 muestra los espectros de reflectancia difusa transformados mediante la función de Kubelka-Munk para las muestras de $SrSb_2O_6$ puro y dopado con itrio. El material sin dopar presentó una energía de banda prohibida aproximada de 3.73 eV, mientras que la muestra dopada exhibió un ligero incremento hasta 3.95 eV, indicando un pequeño corrimiento hacia mayores energías. No obstante, los valores obtenidos en ambos casos se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para este material [8]. En las gráficas de Kubelka-Munk también se observaron contribuciones adicionales de absorción en la región de mayor energía, las cuales podrían estar asociadas con la presencia de fases secundarias detectadas mediante XRD [35]. Asimismo, se identificaron diferencias en la forma e intensidad de dichas contribuciones después del dopado con itrio, lo que sugiere modificaciones estructurales y electrónicas inducidas por la incorporación del dopante [36]. Los desplazamientos observados en los patrones de difracción de rayos X junto a estos

resultados sugieren una incorporación parcial de los iones Y^{3+} en la red cristalina del $SrSb_2O_6$. Estas modificaciones podrían influir en las propiedades fotocatalíticas del material, ya que el dopaje se ha relacionado con cambios en la separación de portadores de carga y en la generación de defectos estructurales [37].

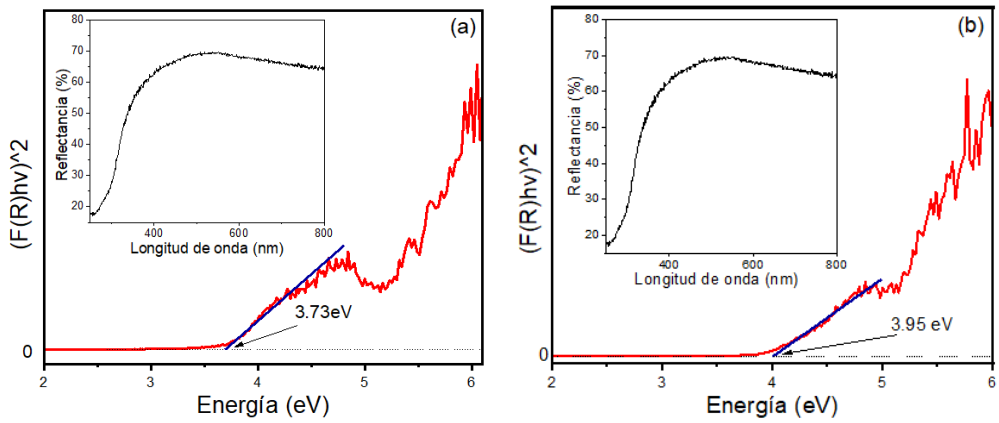


Figura 3. Espectros de reflectancia difusa y gráficos Kubelca-Munk del $SrSbO_6$ (a) sin dopar y (b) dopado con itrio.

Caracterización de los recubrimientos de $SrSbO_6$

Para estudiar las propiedades fotocatalíticas, polvos de $SrSbO_6$ se depositaron sobre vidrio borosilicato mediante la técnica de spin coating. Se eligió este sustrato para minimizar la probabilidad de migración de elementos contaminantes desde el sustrato hacia el recubrimiento durante el tratamiento térmico. Como se indicó en el parte experimental los recubrimientos se fabricaron mediante cinco ciclos de deposición por spin coating. La Figura 4 presenta los perfiles topográficos obtenidos por perfilometría para los recubrimientos de $SrSb_2O_6$ puro y dopado con itrio. En ambos casos los sustratos mostraron un perfil muy rugoso, el espesor se estimó calculando el área bajo la curva de cada perfil, dividiéndolo sobre la longitud de medición (1500μm), el espesor promedio de los recubrimientos no dopados fue de 1.5 μm y para el dopado con itrio 1.2 μm.

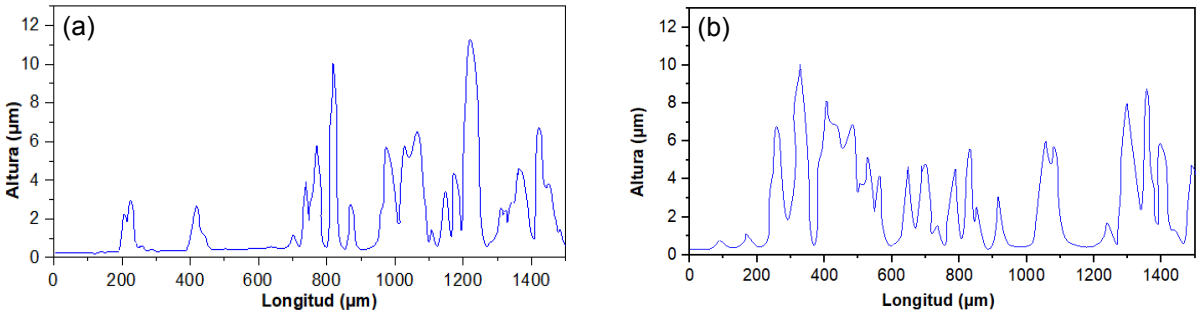


Figura 4. Perfiles topográficos de los recubrimientos obtenidos mediante perfilometría: (a) muestra no dopada y (b) muestra dopada.

La Figura 5 presenta los resultados obtenidos en la evaluación fotocatalítica de los recubrimientos de $SrSbO_6$ puro y dopado con itrio. Las Figuras 5a y 5e muestran las curvas de calibración correspondientes al verde de malaquita y la rodamina B, respectivamente. En ambos casos se observó una relación lineal entre la absorbancia y la concentración del colorante, lo que confirma la confiabilidad del método empleado para cuantificar el porcentaje de degradación fotocatalítica.

Las Figuras 5b y 5c corresponden a los espectros de absorbancia del verde de malaquita obtenidos durante el proceso de fotodegradación empleando los recubrimientos de $SrSbO_6$ y $SrSbO_6$:Y. En particular, la disminución progresiva de la intensidad de la banda principal de absorción evidencia la degradación del colorante conforme aumenta el tiempo de irradiación. La Figura 5d muestra el porcentaje de fotodegradación del verde de malaquita en función del tiempo. Bajo las condiciones experimentales utilizadas, el recubrimiento de $SrSbO_6$ puro presentó una actividad fotocatalítica limitada, alcanzando porcentajes de degradación cercanos a la fotólisis. En contraste, el material dopado con itrio exhibió un incremento significativo en la actividad fotocatalítica, alcanzando aproximadamente un 55 % de degradación después de 180 min de irradiación.

De manera similar, las Figuras 5f y 5g presentan los espectros de absorbancia de la rodamina B durante el proceso de fotodegradación utilizando los recubrimientos no dopados y dopados, respectivamente. En ambos casos se observó una reducción gradual de la intensidad de absorción característica de la rodamina B, indicando la degradación progresiva del colorante. La Figura 5h resume el porcentaje de degradación obtenido para este compuesto, donde nuevamente el recubrimiento dopado con itrio mostró una leve mejoría respecto al material puro, alcanzando valores cercanos al 27 % después de 180 min, mientras que la muestra pura removió un 25%. Es importante aclarar que en ambos casos los recubrimientos no absorbieron una cantidad significativa de colorante. Aunque los porcentajes de degradación obtenidos pueden considerarse moderados, los resultados demuestran que el dopado con itrio favorece la respuesta fotocatalítica del $SrSbO_6$. Además, debido a la limitada información disponible en la literatura sobre la aplicación fotocatalítica de este material, particularmente en recubrimientos obtenidos mediante esta ruta de síntesis y en sistemas dopados con itrio, este estudio aporta información relevante para ampliar el conocimiento sobre las propiedades funcionales de este tipo de óxidos.

Por otra parte, la caracterización óptica mostró un ligero incremento en la energía de la banda prohibida en la muestra dopada con itrio, sin embargo, dicha muestra presentó una mejora en la actividad fotocatalítica. Esto sugiere que el aumento en la eficiencia no está directamente relacionado con una modificación del band gap o con una mayor absorción de radiación, sino posiblemente con modificaciones estructurales y electrónicas inducidas por la incorporación del itrio en la red cristalina. Los corrimientos observados en los picos de difracción obtenidos por XRD indican una posible distorsión de la red y la generación de defectos estructurales, los cuales podrían favorecer la separación y transferencia de los pares electrón-hueco, reduciendo su recombinación y mejorando así el desempeño fotocatalítico del material. Además, de acuerdo con la literatura, los elementos de tierras raras como el itrio poseen orbitales 5d vacíos y orbitales 4f parcialmente ocupados, capaces de actuar como trampas electrónicas para los portadores fotoinducidos, promoviendo una separación de carga más eficiente y favoreciendo la actividad fotocatalítica [38].

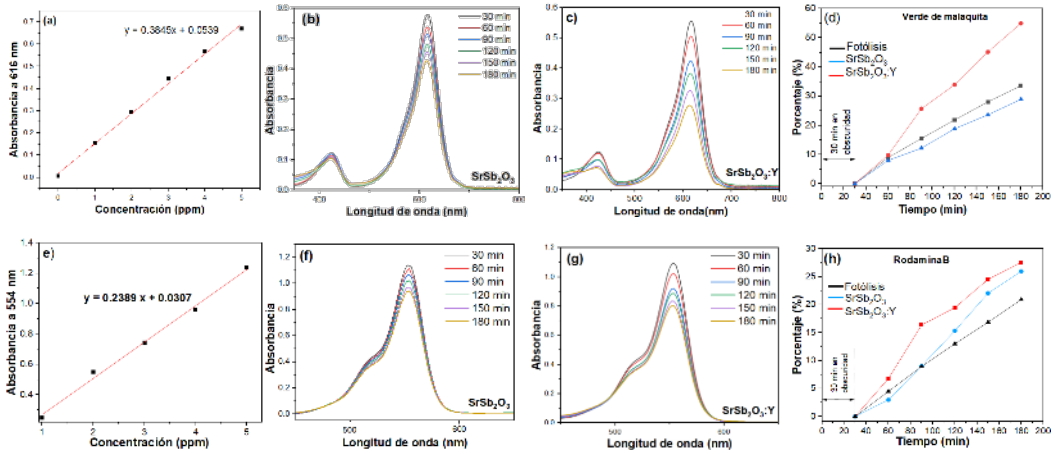


Figura 5. (a) Curva de calibración de verde de malaquita; (b–c) espectros de degradación fotocatalítica de verde de malaquita con $SrSbO_6$ y $SrSbO_6$:Y; (d) porcentaje de degradación de verde de malaquita; (e) Curva de calibración de rodamina; (b–c) espectros de degradación fotocatalítica de rodamina con $SrSbO_6$ y $SrSbO_6$:Y; (d) porcentaje de degradación de rodamina

CONCLUSIONES

En este trabajo se sintetizó exitosamente el antimoniato de estroncio ($SrSb_2O_6$) puro y dopado con itrio al 5% molar mediante un método de química húmeda asistido por microondas, logrando la formación de la fase cristalina tipo trirutilo a temperaturas significativamente inferiores (700 °C) a las reportadas en la literatura para métodos de estado sólido (1000-1150 °C). La caracterización por XRD confirmó la fase trirutilo del material, evidenciando además un ligero corrimiento en los picos de difracción de la muestra dopada lo que sugiere la incorporación parcial de iones Y^{3+} en la red cristalina, así como la presencia de fases secundarias atribuibles a residuos de precursores o reacción incompleta.

El análisis morfológico por SEM reveló una estructura tipo plaqueta en ambas muestras, con una reducción del tamaño de arista de aproximadamente 500 nm a 200 nm tras el dopaje con itrio, lo cual puede contribuir a una mayor área superficial sin alterar la morfología general del material. Los estudios de espectroscopía UV-Vis mediante reflectancia difusa mostraron valores de banda gap de 3.73 eV para el material puro y 3.95 eV para el dopado, ambos resultados están dentro del rango reportado en la literatura para este sistema.

La evaluación fotocatalítica mediante la degradación de verde de malaquita y rodamina B bajo irradiación UV demostró que el dopaje con itrio mejora significativamente la actividad del $SrSb_2O_6$, alcanzando degradaciones del 55% y 27% respectivamente tras 180 min, en contraste con el comportamiento del material no dopado que mostró actividad comparable a la fotólisis. Esta mejora no se atribuye a una reducción o modificación significativa del band gap, sino probablemente a la generación de defectos estructurales y a la capacidad de los orbitales 4f y 5d del itrio para actuar como trampas electrónicas, favoreciendo la separación de pares electrón-hueco y reduciendo su recombinación. Estos resultados posicionan al $SrSb_2O_6$:Y como un material prometedor para aplicaciones de remediación ambiental mediante fotocatálisis heterogénea.

BIBLIOGRAFÍA

1. Md. M. Islam, A. R. Aidid, J. N. Mohshin, H. Mondal, S. Ganguli, A. K. Chakraborty, “A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety”, Cleaner Chem. Eng., Vol. 11, (2025), 100165.
2. Y. Bian, Y. Zhang, Z. Y. Chen, L. Xu, C. Y. Zhang, D. Shi, X. S. Feng, X. Q. Wang, “Malachite green in environmental samples: Updates on sources, fates, distribution and removal techniques”, Ecotoxicol. Environ. Saf., Vol. 303, (2025), 118978.
3. H. Wang, X. Li, X. Zhao, C. Li, X. Song, P. Zhang, P. Huo, X. Li, “A review on heterogeneous photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies”, Chin. J. Catal., Vol. 43, 2, (2022), pp. 178-214.
4. A. Chakravorty, S. Roy, “A review of photocatalysis, basic principles, processes, and materials”, Sustainable Chem. Environ., Vol. 8, (2024), 100155.
5. Y. E. Tasisa, T. K. Sarma, R. Krishnaraj, S. Sarma, “Band gap engineering of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles prepared via green route and its visible light driven for environmental remediation”, Results Chem., Vol. 11, (2024), 101850.
6. S. J. Armaković, S. Armaković, A. Bilić, M. M. Savanović, “ZnO-Based Photocatalysts: Synergistic Effects of Material Modifications and Machine Learning Optimization”, Catalysts, Vol. 15, 8, (2025), 793.
7. N. Arunkumar, S. Naraginti, “Facile synthesis of nanostructured trirutile antimonates M(II)Sb_2O_6 (M = Co, Cu, Ni, Fe) and its visible photocatalytic studies”, Inorg. Nano-Met. Chem., Vol. 52, 1, (2022), pp. 151-160.

8. G. Yao, X. Gao, F. Pan, L. Wang, H. Liu, C. Pei, J. Liu, Y. Jia, F. Wang, “Efficiently tribocatalytic water purification of $SrSb_2O_6$ ceramic powder with a 3.9 eV high band-gap”, Mater. Sci. Semicond. Process., Vol. 197, (2025), 109690.
9. S. R. Tripathy, S. S. Baral, “Defect Engineering in Semiconductor Photocatalysts: Enhancing Photocatalytic Activity for Green Energy Production”, Adv. Energy Sustainability Res., Vol. 6, (2025), 2500110.
10. R. Claes, K. Li, F. Sajid, A. G., R. G. Palgrave, D. O. Scanlon, “Screening ASb_2O_6 (A = Mg, Ca, Sr, Ba, Cd) for High Performance Transparent Conducting Oxides”, ChemRxiv, Vol. 27, (2026).
11. R. D. Shannon, “Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides”, Acta Crystallogr. Sect. A, Vol. 32, (1976), pp. 751-767.
12. C. Bao, A. S. Lotina, M. Niu, R. Portel, Y. Li, K. H. Lim, P. Liu, W. J. Wang, M. A. Banares, Q. Wang, “Microwave-associated chemistry in environmental catalysis for air pollution remediation: A review”, Chem. Eng. J., Vol. 466, (2023), 142902.
13. Y. Han, S. Park, S. Kim, S. Han, Y. Kim, H. S. Jeon, “Enhanced photocatalytic activity of ultrahigh-surface-area TiO_2@C nanorod aggregates with hierarchical porosities synthesized from natural ilmenite”, J. Environ. Chem. Eng., Vol. 9, 1, (2021), 104438.
14. R. Charif, R. Makhloufi, O. R. Selmi, S. C. Mouna, W. Khan, “The investigation of the physical properties and bandgap engineering of the antimony trirutile phase-based magnesium under hydrostatic pressure”, Inorg. Chem. Commun., Vol. 179, (2025), 114758.
15. A. Nagarajan, S. Naraginti, “Facile synthesis of N-$MgSb_2O_6$ trirutile antimonate and its enhanced photocatalytic performance”, Int. J. Environ. Anal. Chem., Vol. 102, 19, (2022), pp. 7938-7952.
16. L. Liu, D. Wang, Y. Zhong, C. Hu, “Electronic, Optical, Mechanical and Lattice Dynamical Properties of $MgBi_2O_6$: A First-Principles Study”, Appl. Sci., Vol. 9, (2019), 1267.
17. G. Ren, H. Han, Y. Wang, S. Liu, J. Zhao, X. Meng, Z. Li, “Recent Advances of Photocatalytic Application in Water Treatment: A Review”, Nanomaterials, Vol. 11, 7, (2021), 1804.
18. A. G. Briseño-Peña, M. Castañeda-Juárez, V. Martínez-Miranda, I. Linares-Hernández, F. Santoyo-Tepole, M. Solache-Ríos, E. A. Teutli-Sequeira, C. R. Fonseca, M. Esparza-Soto, “Heterogeneous Photocatalytic Degradation of a Glucocorticoid in Aqueous Solution and Industrial Wastewater Using TiO_2-Zn(II)-Clinoptilolite Catalyst”, Processes, Vol. 13, 9, (2025), 2781.
19. “Doped Semiconductor Nanocrystals: Synthesis, Characterization, Physical Properties, and Applications”, Prog. Inorg. Chem., Vol. 54, (2005), pp. 47-126.
20. C. Wang, S. Dong, R. Yin, A. Cai, H. Li, Z. Yue, H. Ren, C. Zhang, H. Yin, Y. Wu, “Effect of oxygen vacancies induced by doping rare earth metal elements (La^{3+}, $Ce^{3+/4+}$, Nd^{3+}) in $NaTaO_3$ thin films on photocatalytic and antibacterial properties”, J. Environ. Chem. Eng., Vol. 14, 2, (2026), 121457.
21. S. Mourdikoudis, R. M. Pallares, N. T. K. Thanh, “Characterization techniques for nanoparticles: comparison and complementarity upon studying nanoparticle properties”, Nanoscale, Vol. 10, (2018), pp. 12871-12934.
22. R. Portela Rodríguez, “Eliminación fotocatalítica de H_2S en aire mediante TiO_2 soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A”, in (Editorial CIEMAT, 2009), Capítulo 2, pp. 74-75.
23. R. K. Tekade, “Basic Fundamentals of Drug Delivery”, in Advances in Pharmaceutical Product Development and Research (Academic Press, 2019), Capítulo 10, pp. 369-400.
24. A. S. Hamdy, M. M. Aliofkhazraei, “Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry”, in (Butterworth-Heinemann, 2016), Capítulo 2, pp. 39-54.
25. S. Chowdhury, M. Naushad, “Nanostructured Carbon Nitrides for Sustainable Energy and Environmental Applications”, in (Elsevier, 2022), Capítulo 7, pp. 137-174.
26. B. G. DeBoer, R. A. Young, A. Sakthivel, “Acta Crystallographica Section C”, Vol. 50, (1994), pp. 476-482.
27. A. Maou, N. Gouitaa, T. D. Lamcharfi, N. I. Kandri, “Effect of Calcination Temperature on the Stability of the Perovskite Materials-Study of Structural and Morphological Properties”, Ecol. Eng. Environ. Technol., Vol. 24, 8, (2023), pp. 1-8.
28. R. Cao, T. Fu, D. Peng, C. Cao, W. Ruan, X. Yu, “Synthesis, energy transfer and tunable emission properties of $SrSb_2O6$: Eu^{3+}, Bi^{3+} phosphor”, Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc., Vol. 169, (2016), pp. 192-196.

29. J. Majzlan, X. Jia, K. Lilova, T. Subramani, A. Navrotsky, E. Dachs, A. Benisek, “Thermodynamic stability of selected ASb_2O_6 and $A2Sb_2O_7$ phases (A = Ca, Ba, Cd, Sr, Zn)”, Solid State Sci., Vol. 154, (2024), 107615.
30. B. Rosales, L. Men, S. Cady, A. Rossini, J. Vela, “Persistent Dopants and Amorphous Phases in Organolead Mixed-Halide Perovskites”, Chem. Mater., Vol. 28, 19, (2026), pp. 1-14.
31. G. Sharma, S. Loganathan, E. K. Barimah, P. Georgopoulou, E. Taylor, A. J. Scott, S. Strafford, A. Jha, “Effect of Rare Earth Ion Substitution on Phase Decomposition of Apatite Structure”, ChemPhysChem, Vol. 25, (2024), pp. 1-16.
32. Q. Chang, H. Liang, B. Shi, X. Li, Y. Zhang, L. Zhang, H. Wu, “Ethylenediamine-assisted hydrothermal synthesis of $NiCo_2O_4$ absorber with controlled morphology and excellent absorbing performance”, J. Colloid Interface Sci., Vol. 588, (2021), pp. 336-345.
33. M. U. Choi, T. Hayakawa, “Hydrothermal synthesis and photocatalytic properties of $CuGaO_2$/ZnO hexagonal platelet hybrids”, Mater. Res. Bull., Vol. 113, (2019), pp. 84-89.
34. C. Tang, Y. Zhang, J. Su, C. Wang, R. Sun, J. Zhang, G. Li, “Synthesis and photocatalytic properties of vertically aligned Bi_2S_3 platelets”, Solid State Sci., Vol. 51, (2016), pp. 24-29.
35. J. Klein, L. Kampermann, B. Mockenhaupt, M. Behrens, J. Strunk, G. Bacher, “Limitations of the Tauc Plot Method”, Adv. Funct. Mater., Vol. 33, (2023), 2304523.
36. T. Z. Liza, M. M. H. Tusher, F. Anwar, M. F. Monika, K. F. Amin, “Effect of Ag-doping on morphology, structure, band gap and photocatalytic activity of bio-mediated TiO_2 nanoparticles”.
37. Z. Zafar, S. Yi, J. Li, C. Li, Y. Zhu, A. Zada, W. Yao, Z. Liu, X. Yue, “Recent Development in Defects Engineered Photocatalysts: An Overview of the Experimental and Theoretical Strategies”, Energy Environ. Mater., Vol. 5, (2022), pp. 68-114.
38. G. Wang, S. Lv, Y. Shen, W. Li, L. Lin, Z. Li, “Advancements in heterojunction, cocatalyst, defect and morphology engineering of semiconductor oxide photocatalysts”, J. Materiomics, Vol. 10, (2024), pp. 315-338.

MODELADO DE LA SOBREPRESIÓN DE ONDAS DE CHOQUE PRODUCIDAS POR AIRBURSTS ATMOSFÉRICOS: UN ENFOQUE DE DEPOSICIÓN CONTINUA DE ENERGÍA APLICADO A LA EVALUACIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL

Estefanía Alfaro Quintero, Raúl Gutiérrez-Zalapa, Miguel Alejandro Arreguin Aguirre

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
estefania.alfaro@umich.mx, raul.gutierrez@umich.mx, miguel.arreguin@umich.mx

RESUMEN

El cruce de un meteoroide o pequeño asteroide a través de la atmósfera terrestre puede generar ondas de choque intensas asociadas a procesos de ablación, fragmentación progresiva y airburst. Estas ondas, caracterizadas comúnmente mediante el parámetro de overpressure, son responsables de una fracción significativa de los daños observados en eventos históricos como Tunguska (1908) o Chelyabinsk (2013), afectando estructuras de madera, concreto armado y superficies acristaladas a escalas regionales. En este trabajo se analiza la relación entre la energía depositada en la atmósfera y la generación de ondas de choque, con énfasis en cómo la altura del burst y del break-up controla la atenuación espacial del daño estructural. Se propone un modelo alternativo al implementado en literatura especializada, que trata la liberación de energía como un evento puntual equivalente (TNT-like). El nuevo enfoque modela la deposición de energía como un proceso continuo a lo largo de la trayectoria atmosférica, representado mediante una función longitudinal de energía específica por unidad de altura. Este perfil se acopla a un modelo semi-empírico de propagación de ondas de choque no lineales, que distingue entre tres regímenes de daño: flexión estructural (madera), falla frágil (vidrio) y daño por sobrecarga dinámica (concreto). La altura efectiva del burst se define de forma probabilística como el máximo de energía depositada, en lugar de un único punto de explosión. Desde el punto de vista estadístico, el modelo incorpora distribuciones lognormales para la resistencia estructural y funciones de fragilidad dependientes del overpressure y del impulso dinámico. Se realiza un análisis Monte Carlo para evaluar la variabilidad del daño esperado bajo incertidumbres en masa, velocidad, ángulo de entrada y resistencia mecánica del cuerpo. Los resultados muestran que, para airbursts entre 15 y 35 km de altura, el nuevo modelo predice una dispersión del daño significativamente mayor que el modelo puntual, pero con mejor concordancia con observaciones empíricas de rotura de ventanas y daños leves en estructuras. Este enfoque permite una evaluación más realista del riesgo asociado a eventos atmosféricos de impacto no cráter-formadores.

INTRODUCCIÓN

Los impactos atmosféricos producidos por meteoroides y pequeños asteroides representan una fuente importante de riesgo natural debido a la generación de ondas de choque capaces de producir daños estructurales a grandes distancias. Durante la entrada atmosférica, estos cuerpos experimentan procesos complejos de ablación, fragmentación progresiva y liberación de energía, los cuales pueden culminar en un airburst o explosión aérea.

Eventos históricos como el Evento de Tunguska de 1908 y el meteorito de Chelyabinsk de 2013 demostraron que incluso impactos no cráter-formadores pueden generar sobrepresiones suficientemente intensas para destruir estructuras ligeras, fracturar superficies acristaladas y producir daños regionales significativos (Popova et al., 2013; Boslough y Crawford, 2008).

La evaluación del daño asociado a estos fenómenos depende principalmente de la caracterización de las ondas de choque atmosféricas, particularmente del parámetro de overpressure o sobrepresión máxima. Tradicionalmente, numerosos modelos aproximan la liberación de energía como una explosión puntual equivalente a TNT, simplificando la física del fenómeno a una detonación instantánea localizada a una determinada altura (Glasstone y Dolan, 1977).

Sin embargo, esta aproximación presenta limitaciones importantes, ya que ignora que la deposición de energía ocurre de manera continua a lo largo de la trayectoria atmosférica del cuerpo, especialmente durante las etapas de fragmentación y desaceleración aerodinámica.

En este trabajo se propone un modelo alternativo de deposición continua de energía para describir la generación y propagación de ondas de choque producidas por airbursts atmosféricos. El enfoque considera un perfil longitudinal de energía específica por unidad de altura, acoplado a un modelo semiempírico de propagación de ondas no lineales. Asimismo, se incorpora una descripción probabilística de la resistencia estructural mediante funciones de fragilidad y distribuciones lognormales aplicadas a diferentes tipos de materiales, incluyendo madera, vidrio y concreto armado. Finalmente, se emplea un análisis Monte Carlo para cuantificar la incertidumbre asociada a parámetros físicos del meteoroide y evaluar la variabilidad espacial del daño esperado.

TEORÍA

Entrada atmosférica y deposición de energía
Durante la entrada atmosférica, el meteoroide experimenta desaceleración aerodinámica y ablación debido a la interacción con la atmósfera terrestre. La fragmentación ocurre cuando la presión dinámica excede la resistencia mecánica del cuerpo (ReVelle, 1976):

$$\boldsymbol{q = \frac{1}{2}\,\rho_a\, v\text{^}2,}$$

donde, $\boldsymbol{q}$ es la presión dinámica, $\boldsymbol{\rho_a}$ es la densidad atmosférica y $\boldsymbol{v}$ es la velocidad del meteoroide.

A diferencia de los modelos tradicionales tipo TNT-equivalente, en este trabajo se considera que la energía liberada se distribuye continuamente a lo largo de la trayectoria atmosférica. La energía depositada por unidad de altura se representa mediante:

$$\boldsymbol{\frac{dE}{dh} = f(h),}$$

siendo $\boldsymbol{dE/dh}$ la energía específica liberada, $\boldsymbol{h}$ corresponde a la altura atmosférica.

El perfil longitudinal de deposición energética se aproximó mediante una distribución gaussiana:

$$\boldsymbol{\frac{dE}{dh} = E_0 \exp\left(-\frac{(h - h_c)^2}{2\sigma_h^2}\right),}$$

Con $\boldsymbol{E_0}$ la energía máxima depositada, $\boldsymbol{h_c}$ es la altura de máxima deposición y $\boldsymbol{\sigma_h}$ representa la dispersión longitudinal.

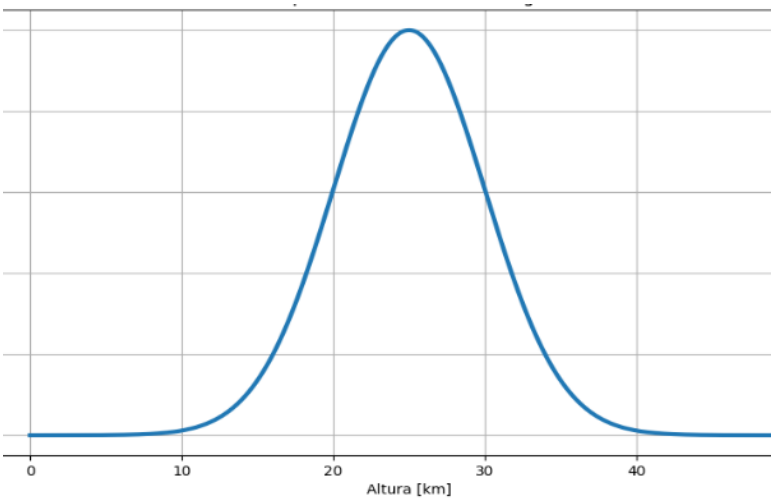


Figura 1. Perfil longitudinal de deposición continua de energía atmosférica en función de la altura.

Modelo de sobrepresión

La sobrepresión máxima generada por la onda de choque se modeló mediante una relación semiempírica dependiente de la energía efectiva y de la distancia radial

$$\Delta P(r) = K\left(\frac{E_{eff}}{r^3}\right)^{\alpha}$$

donde, $\Delta P(r)$ es la sobrepresión máxima, E_{eff} representa la energía efectiva depositada, r es la distancia radial, K y α son constantes empíricas.

Para el modelo continuo, la sobrepresión total se obtuvo integrando la contribución energética a lo largo de la trayectoria:

$$\Delta P_{tot}(r) = \int_{h_{min}}^{h_{max}} G(r,h)\frac{dE}{dh}dh,$$

donde $G(r,h)$ representa la función de propagación atmosférica de la onda de choque.

Fragilidad estructural

La probabilidad de daño estructural fue modelada mediante funciones de fragilidad basadas en distribuciones lognormales:

$$P(D \geq d) = \Phi\left(\frac{\ln(\Delta P) - \mu_d}{\beta_d}\right)$$

donde, Φ es la función de distribución normal acumulada, μ_d representa el umbral medio de daño, β_d es la dispersión estadística.

Se analizaron tres mecanismos principales de daño:

- falla frágil en vidrio,
- flexión estructural en madera,
- sobrecarga dinámica en concreto armado.

PARTE EXPERIMENTAL

El modelo fue implementado numéricamente mediante simulaciones computacionales desarrolladas en Python. Se consideraron escenarios de airburst atmosférico con alturas comprendidas entre 15 y 35 km, utilizando parámetros típicos de meteoroides rocosos reportados en literatura especializada (Gutierrez-Zalapa et al., 2024).
Las simulaciones incorporaron variaciones aleatorias mediante análisis Monte Carlo sobre:

- masa inicial del meteoroide,
- velocidad de entrada atmosférica,
- ángulo de ingreso,
- resistencia mecánica del cuerpo.

Para cada simulación se calculó:

1. El perfil longitudinal de deposición energética.
2. La sobrepresión máxima sobre superficie.
3. Las probabilidades de daño estructural para cada material.

Posteriormente, los resultados obtenidos fueron comparados con un modelo clásico de explosión puntual equivalente a TNT con el objetivo de evaluar diferencias en la distribución espacial del daño.

RESULTADOS

Los resultados muestran que el modelo de deposición continua reproduce una distribución espacial de sobrepresión significativamente más extensa que el modelo puntual equivalente a TNT.

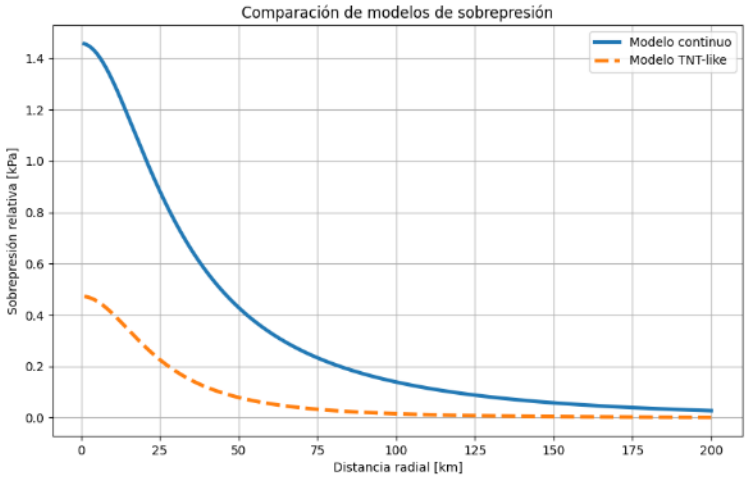


Figura 2. Comparación entre el modelo continuo y el modelo TNT-like para la distribución radial de sobrepresión.

Se observa que el modelo continuo genera valores de sobrepresión más elevados a distancias medias y largas, produciendo una dispersión lateral del daño considerablemente mayor. Este comportamiento es consistente con observaciones empíricas registradas en el evento de Chelyabinsk (Popova et al., 2013).

Asimismo, el análisis probabilístico de fragilidad estructural mostró que las superficies acristaladas presentan la mayor sensibilidad frente a pequeñas variaciones de sobrepresión.

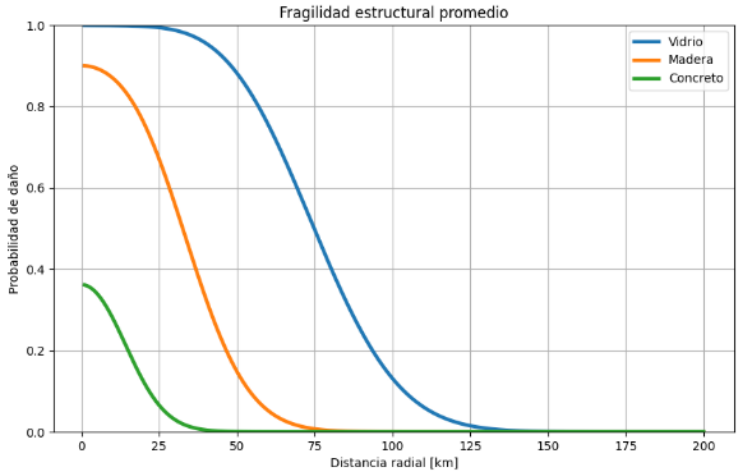


Figura 3. Funciones promedio de fragilidad estructural para vidrio, madera y concreto armado.

Las estructuras de vidrio alcanzaron probabilidades de daño cercanas a la unidad incluso para sobrepresiones moderadas, mientras que las estructuras de concreto armado presentaron una respuesta significativamente más resistente.

Los resultados también indican que la altura del airburst controla de forma importante tanto la intensidad máxima de la onda de choque como la extensión espacial del daño. Para alturas superiores a 30 km, la energía se distribuye sobre un volumen atmosférico mayor, reduciendo la intensidad máxima pero incrementando el área afectada por daños leves.

Con el objetivo de visualizar la distribución espacial del daño esperado, se construyó un mapa probabilístico superficial a partir de los resultados obtenidos mediante simulaciones Monte Carlo. El mapa representa la probabilidad acumulada de daño estructural considerando simultáneamente la variabilidad en masa, velocidad, ángulo de entrada y resistencia mecánica del meteoroide.

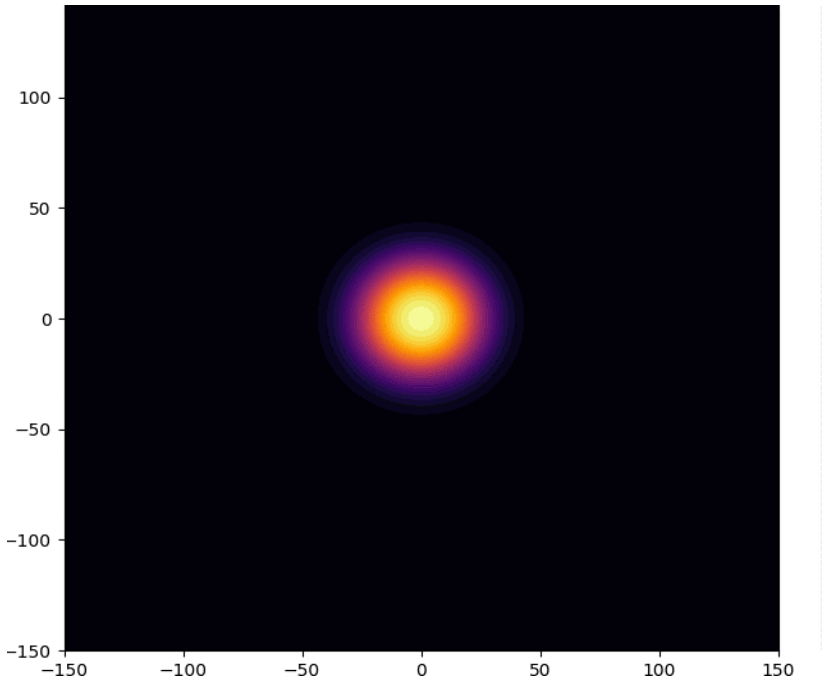


Figura 4. Mapa probabilístico de daño superficial asociado a la sobrepresión generada por el airburst atmosférico.

La distribución espacial obtenida muestra que el modelo continuo produce regiones extensas de daño leve y moderado, incluso a grandes distancias radiales respecto al eje de trayectoria. Este comportamiento difiere significativamente del modelo puntual equivalente a TNT, el cual concentra la mayor parte del daño cerca del punto de explosión.

Asimismo, el mapa probabilístico evidencia transiciones graduales entre regiones de alta y baja probabilidad de daño, reproduciendo de manera más realista los patrones observados en eventos atmosféricos históricos como Chelyabinsk.

El modelo permite transitar desde una descripción determinista de sobrepresión hacia una caracterización espacial probabilística del riesgo estructural.

Las simulaciones Monte Carlo evidenciaron además una alta variabilidad estadística en los patrones de daño cuando se introducen incertidumbres en masa, velocidad y resistencia mecánica del meteoroide.

CONCLUSIONES

El modelo de deposición continua de energía desarrollado en este trabajo constituye una alternativa físicamente más realista frente a los enfoques tradicionales basados en explosiones puntuales equivalentes a TNT.

La representación longitudinal de la liberación energética permite describir de manera más adecuada los procesos de ablación, fragmentación y desaceleración que experimentan los meteoroides durante la entrada atmosférica.

Los resultados obtenidos muestran que:

- el modelo continuo predice una mayor dispersión espacial del daño,
- la altura del airburst controla significativamente la atenuación de la onda de choque,
- las estructuras acristaladas presentan la mayor vulnerabilidad frente a sobrepresiones moderadas,
- las incertidumbres físicas del meteoroide generan una elevada variabilidad en los escenarios de daño esperado.

Además, el modelo mostró una mejor concordancia cualitativa con observaciones empíricas reportadas para eventos históricos no cráter-formadores, particularmente en la distribución regional de daños leves y moderados.

Finalmente, este enfoque representa una herramienta potencialmente útil para futuras evaluaciones de riesgo por impacto atmosférico y aplicaciones relacionadas con protección civil y análisis de amenazas naturales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Boslough, M. B. E., & Crawford, D. A. (2008). Low-altitude airbursts and the impact threat. *International Journal of Impact Engineering*, *35*(12), 1441-1448.
2. Glasstone, S., & Dolan, P. (1977). The effects of nuclear weapons, US Department of Defense. *Energy Research and Development Administration, Washington*.
3. Gutierrez-Zalapa, R., Rodríguez-Martínez, M., Aguilar-Rodríguez, E., & Estevez-Delgado, J. (2024). Modeling the impact of asteroids over Mexican territory. *Revista mexicana de física*, *70*(1).
4. Popova, O. P., Jenniskens, P., Emel'yanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., ... & Chelyabinsk Airburst Consortium). (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, *342*(6162), 1069-1073.

5. ReVelle, D. O. (1976). On meteor-generated infrasound. *Journal of Geophysical Research*, *81*(7), 1217-1230.

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE HUESO FEMORAL DE ACUERDO AL MEDIO DE CONSERVACIÓN

J. Javier Padilla H., Brenda M. Guzman V., Manuel H. De La Torre I., Claudio Frausto-Reyes

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. – Unidad Aguascalientes.
javierph@cio.mx.

RESUMEN

Almacenar tejidos biológicos como el hueso para posteriormente llevar a cabo pruebas experimentales es una práctica común. Los medios de preservación más empleados son la solución salina y el formol y al realizar análisis químicos o pruebas puntuales, no se reportan cambios en este tipo de tejido debido al almacenamiento. Sin embargo, el efecto del almacenamiento en el comportamiento mecánico del hueso en campo completo no ha sido estudiado aún. En este trabajo se analiza la deformación mecánica en campo completo de huesos femorales *ex-vivo* de ratón (*Mus musculus*) utilizando técnicas ópticas no destructivas. Para las pruebas se utilizan huesos femorales de ratón adulto, los cuales se someten a una prueba estándar de flexión de tres puntos. Las muestras se dividen en tres grupos: el primero es el grupo de control, con muestras frescas post-mortem; el segundo y el tercer grupo son muestras almacenadas en solución salina y en formol, respectivamente. Durante cada prueba mecánica se analizan simultáneamente las deformaciones superficiales e internas utilizando Interferometría Holográfica Digital y Tomografía de Coherencia Óptica. De manera complementaria, se realizó espectroscopía Raman para demostrar que el medio de conservación no afecta la composición del tejido óseo en pruebas puntuales. Los resultados muestran que los huesos preservados en solución salina mantienen un comportamiento mecánico viscoelástico similar al de las muestras frescas, incluso después de 48 horas de inmersión. De forma contraria, los huesos almacenados en formol presentan cambios en su respuesta mecánica, además de alteraciones estructurales en la médula ósea. Se concluye que el medio de preservación modifica el comportamiento mecánico del hueso sin producir cambios en su firma química. La solución salina se puede considerar como el medio de preservación adecuado para huesos cuando se realizan ensayos mecánicos post mortem después de varias horas de almacenamiento. Con esto se puede evaluar el efecto del tiempo de preservación en solución salina y formol sobre la respuesta mecánica y establecer ventanas temporales seguras de almacenamiento de muestras destinadas a ensayos biomecánicos. Analizar otros medios de conservación utilizados en investigación, como congelación, o la inmersión en etanol, pueden definir protocolos de preservación óptimos de acuerdo al tipo de ensayo mecánico requerido.

INTRODUCCIÓN

La metrología óptica ha adquirido gran relevancia en aplicaciones mecánicas e industriales por su capacidad de obtener información de forma remota y no invasiva. En particular, las técnicas ópticas permiten analizar deformaciones [1], desplazamientos [2] y distribución de esfuerzos [3,4] con alta sensibilidad y resolución espacial. Estas ventajas han impulsado su aplicación en materiales biológicos, donde las propiedades mecánicas suelen ser anisotrópicas y altamente dependientes de la estructura interna [5,6].

Pruebas mecánicas que utilizan técnicas ópticas pueden aplicarse a estructuras naturales como el hueso [7]. El tejido óseo constituye un material biológico complejo formado principalmente por componentes inorgánicos (hidroxiapatita), componentes orgánicos (proteínas y colágeno) y agua [8]. La combinación de estos elementos proporciona al hueso propiedades viscoelásticas y anisotrópicas que le permiten soportar esfuerzos mecánicos mientras mantiene una estructura ligera [9]. Debido a estas características, las propiedades mecánicas del hueso son de interés en áreas como biomecánica, medicina regenerativa, ortopedia y análisis de enfermedades degenerativas. En la

mayoría de las investigaciones reportadas se utilizan huesos de ratón, de porcinos o bovinos debido a que los huesos humanos son restringidos y controlados.

En estudios experimentales *ex vivo*, las muestras biológicas no siempre pueden analizarse inmediatamente después de su extracción. Por ello, es común utilizar medios de preservación que permitan almacenar temporalmente los tejidos para análisis posteriores. Entre los medios más empleados se encuentran la solución salina y el formol [10,11]. Aunque ambos son ampliamente utilizados, la mayoría de los estudios se concentran en evaluar sus propiedades químicas y determinar su composición, mientras que el impacto sobre su respuesta mecánica se omite.

En el presente trabajo se utilizan huesos femorales de ratón para analizar el impacto del medio de preservación en su respuesta mecánica completa. Para ello, se propone el uso simultáneo de dos técnicas ópticas no-invasivas, Interferometría Holográfica Digital (DHI) y Tomografía de Coherencia Óptica en Dominio Fourier (FD-OCT) para analizar la deformación superficial e interna de los huesos sometidos a pruebas de flexión en tres puntos. El análisis integral proporcionado por ambas técnicas permite detectar modificaciones mecánicas que podrían pasar desapercibidas mediante métodos puntuales convencionales.

TEORÍA

DHI es una técnica óptica capaz de medir desplazamientos superficiales con alta sensibilidad [12]. Al ser una técnica de doble exposición, es necesario obtener la diferencia de fase óptica relativa entre los estados de referencia (C_r) y modificado (C_m) del objeto, a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta\varphi_{DHI} = atan\left(\frac{Re\{C_r\}Im\{C_m\} - Im\{C_r\}Re\{C_m\}}{Im\{C_r\}Im\{C_m\} + Re\{C_r\}Re\{C_m\}}\right), \quad (1)$$

dónde Re e Im son las partes real e imaginaria de los valores complejos que se obtienen a partir de aplicar un filtro pasa-banda a las imágenes de holograma. Los mapas de fase óptica envuelta $\Delta\varphi_{DHI}$ tienen valores entre $-\pi$ y π por lo que es necesario aplicar un algoritmo de desenvolvimiento para obtener valores de continuos de fase óptica $\Delta\varphi'_{DHI}$. A partir de esta última, se obtienen los mapas de desplazamiento w a lo largo del eje de observación z con

$$w = \frac{\lambda}{2\pi}\frac{\Delta\varphi'_{DHI}}{(1+\cos\theta)}, \quad (2)$$

en dónde λ es la longitud de onda de la fuente de iluminación y θ es el ángulo que se forma entre las direcciones de iluminación y observación.

Por otra parte, la Tomografía de Coherencia Óptica en Dominio Fourier (FD-OCT) permite obtener la respuesta interna del objeto. Al utilizar la transformada de Fourier en las imágenes se obtiene la señal espectral y, además de proporcionar información morfológica, la técnica puede proporcionar la diferencia de fase óptica asociada a las deformaciones internas del material. Su principio se basa en un interferómetro de Michelson que utiliza un espectrómetro para separar todas las longitudes de onda de la fuente de iluminación [13]. De esta manera, la señal de interferencia está dada por

$$I(k,y) = \sum_{k=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} 2\sqrt{I_r(y)I_o(k,y)}\cos(\xi(k,y)), \quad (3)$$

dónde I_r y I_o son las intensidades de los haces referencia y objeto, ξ es el término de interferencia y k el rango de frecuencias de la fuente de iluminación de baja coherencia. Es posible obtener información de una línea en el eje *y*, en una sola imagen al utilizar una configuración que ilumina una línea sobre el objeto. La diferencia de fase óptica está dada por

$$\Delta\varphi_{OCT} = atan\left(\frac{Re\{I_{ref}(z)\}Im\{I_{mod}(z)\} - Im\{I_{ref}(z)\}Re\{I_{mod}(z)\}}{Im\{I_{ref}(z)\}Im\{I_{mod}(z)\} + Re\{I_{ref}(z)\}Re\{I_{mod}(z)\}}\right), \quad (4)$$

dónde I_{ref} y I_{mod} son las imágenes tomográficas de referencia y modificadas; Re y Im son las partes real e imaginaria de la transformada de Fourier de cada imagen tomográfica. La fase desenvuelta $\Delta\varphi'_{OCT}$ se obtiene después de aplicar el algoritmo de desenvolvimiento.

La combinación simultánea de DHI y FD-OCT proporciona una caracterización biomecánica complementaria. Mientras DHI registra la deformación superficial del hueso, FD-OCT permite observar la respuesta interna del tejido óseo y de la médula.

PARTE EXPERIMENTAL

Huesos

Para las pruebas mecánicas se utilizaron huesos femorales de ratones adultos (*Mus musculus*), como se muestra en la Figura 1, de aproximadamente tres meses de edad y pesos entre 20 y 30 g. Los procedimientos para la toma de muestras se desarrollaron bajo la Guía de Ética para el Uso de Animales en Investigación [14]. Los especímenes fueron clasificados en tres grupos experimentales: post-mortem (PM), solución salina (SS) y solución formol (FM). Además, se hizo una distinción entre huesos de macho y hembra, como se muestra en la tabla 1.

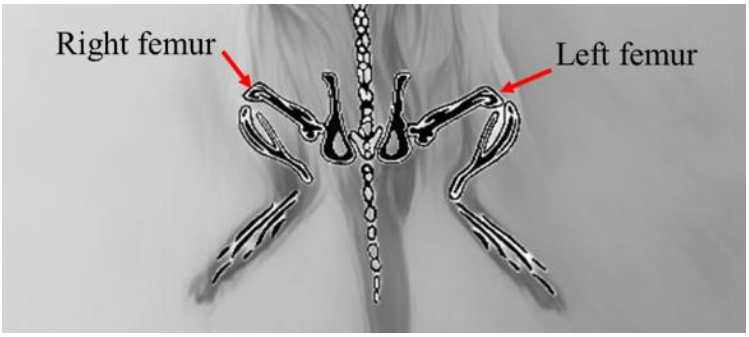


Figura 1. Representación esquemática del esqueleto del ratón, indicando los huesos femorales izquierdos y derechos utilizados en las pruebas. Tomado de [18].

Tabla 1. Clasificación de los huesos por grupos. Tomado de [18].

Preservation method		**Fresh post mortem**		**Saline solution**		**Formaldehyde solution**	
Gender		**Female**	**Male**	**Female**	**Male**	**Female**	**Male**
Code	***Left femur***	**PM-F-L**	**PM-M-L**	**SS-F-L**	**SS-M-L**	**FM-F-L**	**FM-M-L**
	Right femur	**PM-F-R**	**PM-M-R**	**SS-F-R**	**SS-M-R**	**FM-F-R**	**FM-M-R**

Las muestras del grupo post-mortem se analizan después de su extracción y limpieza; no requieren tratamiento adicional. Por otro lado, las muestras de los grupos SS y FM, después de su extracción y limpieza se sumergen en sus respectivas soluciones durante 48 h. Todas las muestras tuvieron un periodo de secado de 120 min previo a las pruebas para evitar reflexiones especulares.

Flexión de tres puntos

Para inducir la deformación mecánica se empleó una prueba de flexión en tres puntos (3PB). Esta prueba consiste en aplicar una carga controlada sobre el centro de la muestra mientras los extremos permanecen fijos. La técnica es ampliamente utilizada para evaluar resistencia mecánica, rigidez y comportamiento ante fractura en materiales rígidos y estructuras biológicas [15]. Cada hueso es colocado sobre dos soportes separados fijos 12.5 mm (1 y 2 en Figura 2), mientras que un motor a pasos (SM) aplica desplazamientos controlados en el punto central, como se observa en la Figura 2. El SM avanza 1.25 µm por paso mientras las cámaras de ambos arreglos (DHI + FD-OCT) capturan imágenes a una tasa de 1.5 imágenes por segundo. El motor avanza hasta alcanzar la fractura. Los mapas de desplazamiento total se obtienen a partir de las imágenes capturadas por ambos arreglos.

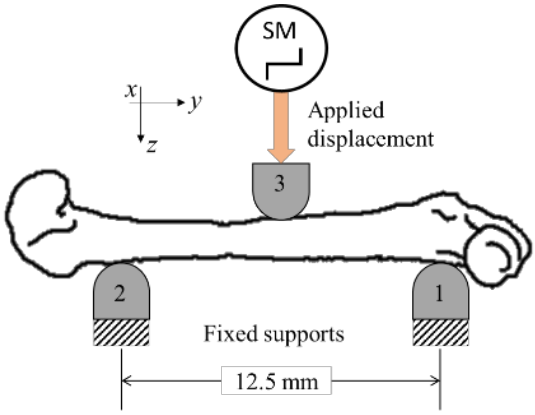


Figura 2. Esquemático de la prueba de flexión de tres puntos aplicada a los huesos femorales de ratón, donde se muestran los soportes fijos (1 y 2) y el desplazamiento aplicado en un punto (3). La cara frontal del hueso es la sección observada por los arreglos ópticos. Tomado de [18].

Arreglo Dual

Para inspeccionar las muestras durante las pruebas 3PB, ambos sistemas ópticos se configuran para registrar imágenes continuas durante los desplazamientos aplicados. El sistema DHI observa el plano *xy* de la cara anterior de cada hueso (Figura 3a); mientras tanto, el sistema OCT registra una imagen tomográfica en el plano *zy* alineado con la vista medial, como se muestra en la Figura 3b. Ambas técnicas se alinean para enfocar la superficie ósea, donde se establece una región común para la inspección interna, como se muestra en la Figura 3c.

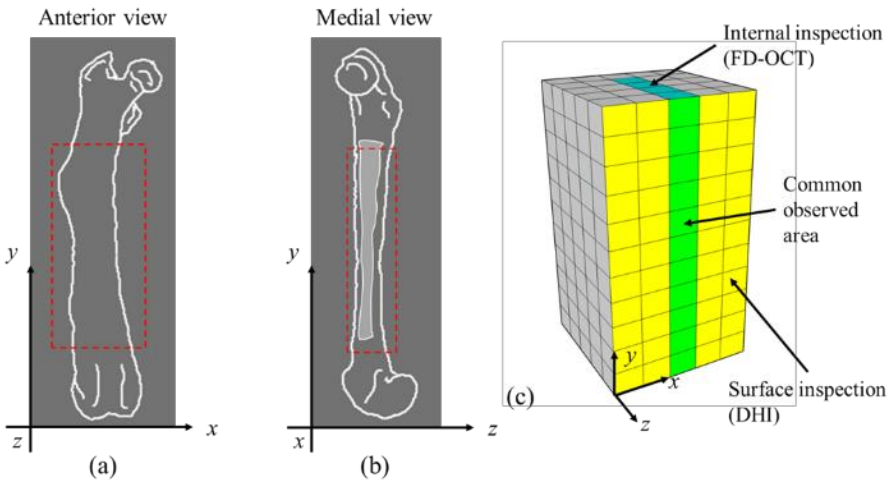


Figura 3. Vista lateral del hueso mediante (a) DHI (superficie) y (b) FD-OCT (sección interna). (c) Ejemplo esquemático de una sección ósea que indica el área común observada en ambas técnicas. El rectángulo rojo de líneas discontinuas cortas en (a) y (b) señala la región del hueso observada. Tomado de [18].

En la vista esquemática que se presenta en la Figura 4, Los arreglos DHI y FD-OCT se representan como módulos separados; sus diagramas individuales se presentan en las Figuras 4b y 4c, respectivamente. Al nivel del hueso se coloca la configuración FD-OCT, mientras que DHI se sitúa por encima. Ambas técnicas observan la misma superficie ósea. DHI utiliza un láser Cobolt Samba de 532 nm como fuente de luz, que se divide en los haces objeto (OB) y referencia (RB) mediante un divisor de haz 80/20 (BS1). El haz de objeto ilumina la muestra, en este caso, la cara anterior (eje mayor) del hueso, cuya retroesparcimiento se enfoca en el sensor de la cámara C1 (Pixelink monocromo con 1280 × 1024 píxeles) a través de una apertura (A) y una lente (L1) con una distancia

focal de 150 mm. El haz de referencia se combina con el haz del objeto mediante un combinador de haces 50/50 (BC).

El sistema FD-OCT está configurado para obtener una línea en una sola toma; utiliza un módulo Superlum Broad Lighter HP1 (SLD) centrado en 840 nm con un ancho de banda de 50 nm como fuente de iluminación. Esta fuente se lanza con el haz láser utilizado en DHI (para fines de alineación) a través de un acoplador óptico (OC). Una terminal del OC está bloqueada (BT), mientras que la otra está colimada (CT) y dirigida al sistema. Este último se divide en los brazos objeto y referencia con un divisor de haz (BS2). El objeto se ilumina con una línea mediante una lente cilíndrica (CL1) y una lente esférica (L2) con distancias focales de 150 mm y 100 mm, respectivamente. El retroesparcimiento del objeto se suma al haz de referencia reflejado (que pasa a través de L3 con una distancia focal de 100 mm), y ambos se difractan mediante una rejilla de difracción de reflexión escalonada (G) con 1200 líneas/mm, que se enfoca en el sensor de la cámara C2 (Pixelink monocromo con 1280 × 1024 píxeles) con L4, una lente esférica con una distancia focal de 150 mm. El haz de referencia se refleja en un espejo de oro protegido (M1) y se atenúa mediante un filtro de densidad neutra (NDF).

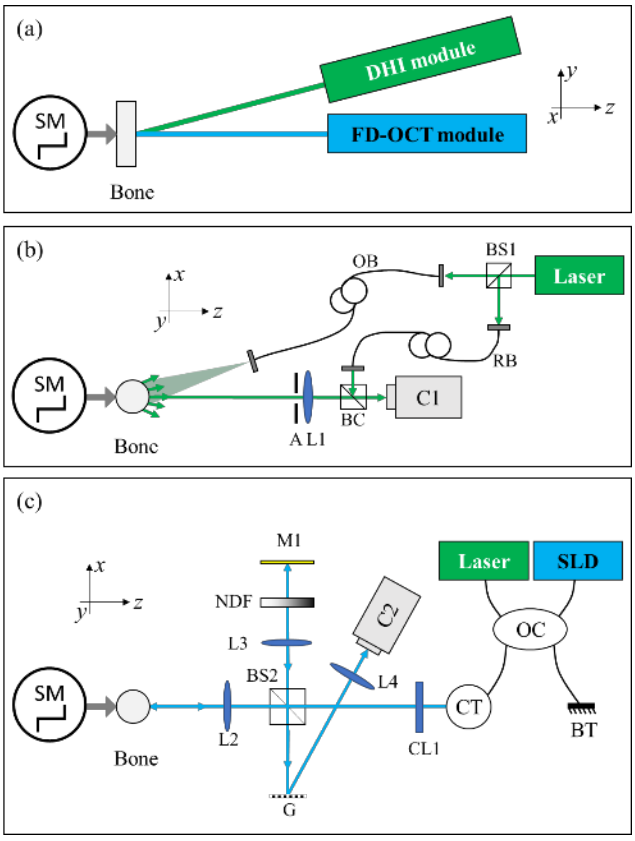


Figura 4. (a) Vista esquemática de la configuración dual experimental que muestra la posición de cada módulo. Esquemas de los módulos (b) DHI y (c) FD-OCT. OB y RB son los haces de objeto y de referencia. BS1 y BS2 son divisores de haz. BC es un combinador de haz; A es una apertura. L1, L2, L3 y L4 son lentes esféricas, CL1 es una lente cilíndrica, G es la rejilla de difracción, M1 es un espejo, C1 y C2 son las cámaras, SLD es un diodo superluminiscente, OC es un acoplador óptico, BT es una terminal bloqueada, CT es una terminal colimada y NDF es un filtro de densidad neutra. Tomado de [18].

Todas las pruebas siguen la siguiente secuencia: Se fija el hueso, los sistemas ópticos empiezan a registrar imágenes y el SM mueve la punta de desplazamiento hasta alcanzar la parte posterior del

hueso; en ese instante se observa un cambio de fase óptica y el desplazamiento aplicado continúa hasta fracturar cada hueso; ambos sistemas detienen el registro y se prueba un nuevo hueso.

Al concluir las pruebas de todos los huesos, la información óptica se procesa para obtener la fase óptica para DHI y FD-OCT. Para medir la deformación que experimenta cada hueso, el instante de la fractura se utiliza como punto común para ambos métodos, dado que tienen la misma velocidad de registro. A partir de este instante, se consideran cien imágenes anteriores a la fractura para recuperar el desplazamiento temporal aplicado por el SM, lo que permite comparar directamente todos los huesos. La deformación total resultante para este periodo es lo suficientemente grande como para evitar el ruido de moteado en ambos métodos. Para obtener el desplazamiento temporal (total), es necesario recuperar las fases ópticas escalonadas para aplicar un método de desenvolvimiento temporal.

Espectroscopía Raman

Se utiliza espectroscopía Raman como método de comparación molecular. Esta técnica se utiliza para para estudiar la respuesta vibracional, rotacional y de otros modos de vibración de baja frecuencia de una muestra [16]. Los espectros Raman permiten identificar cambios en la composición molecular de la muestra. En este caso, Raman se utiliza para analizar muestras de hueso femoral de diferentes grupos. Los espectros Raman se obtuvieron de diferentes puntos de la superficie del fémur (tamaño del punto de 2 µm) con un sistema Micro Raman que utiliza un láser de excitación de 632,8 nm y un objetivo de microscopio de 40X con una apertura numérica de 0,75. El espectrómetro Raman se calibró utilizando el pico de 520 cm^{-1} de una oblea de silicio. La sustracción del fondo de fluorescencia se realizó con el software OriginPro (OriginLab Corporation) mediante una aproximación polinómica.

RESULTADOS

Las Figuras 5 y 6 muestran mapas de fase envuelta de cada grupo y género de los huesos obtenidos con los módulos DHI y FD-OCT, respectivamente. Para simplificar, las fases ópticas DHI muestran los fémures derechos, mientras que OCT muestra los izquierdos, ya que sus pares correspondientes presentan resultados similares.

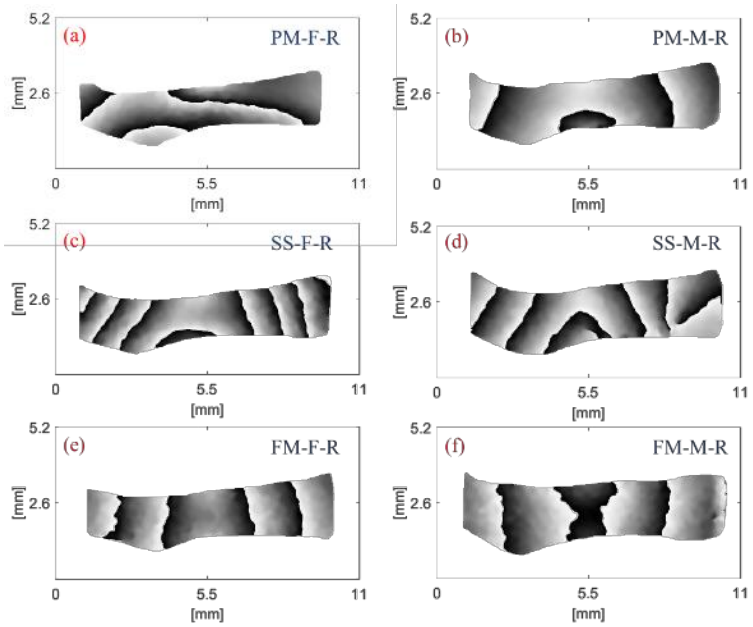


Figura 5. Mapas de fase envueltos DHI de huesos femorales (a,c,e) femeninos y (b,d,f) masculinos. Tomado de [18].

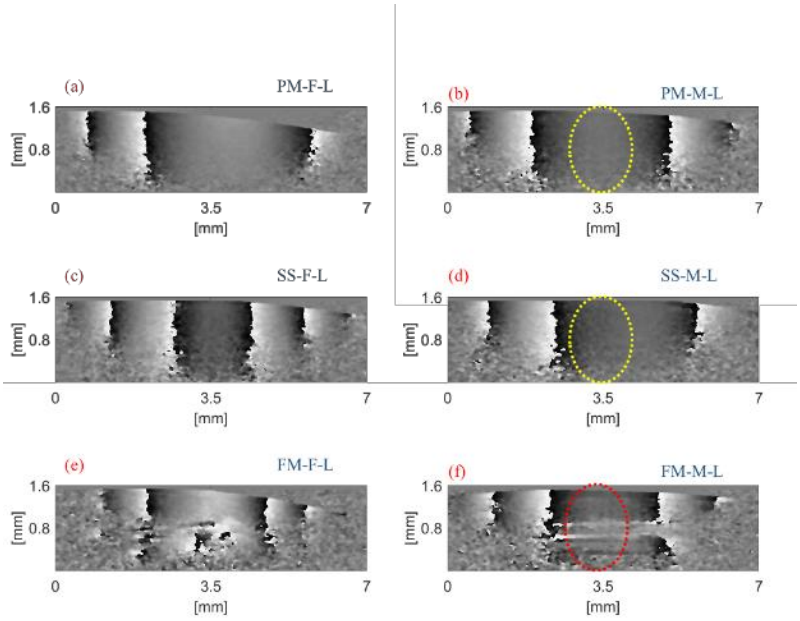


Figura 6. Mapas de fase envueltos FD-OCT de huesos femorales (a,c,e) femeninos y (b,d,f) masculinos. Tomado de [18].

Los mapas de fase obtenidos mediante DHI (ver Figura 5) muestran diferencias importantes entre los grupos experimentales. Los huesos de los grupos PM y SS presentan distribuciones de deformación asimétricos, características del comportamiento viscoelástico y anisotrópico natural del tejido óseo. En estos casos, las deformaciones máximas se localizan cerca de los bordes y no en el centro de la muestra. En contraste, las muestras preservadas en formol mostraron patrones de deformación más simétricos y uniformes. Este comportamiento sugiere una pérdida parcial de la anisotropía natural del hueso y una modificación significativa de su respuesta mecánica.

Por otro lado, los resultados obtenidos mediante FD-OCT complementaron el análisis superficial al revelar cambios internos en la médula ósea (ver Figura 6). En los grupos PM y SS, la respuesta interna fue continua y homogénea (elipse amarilla en Figuras 6e y 6f); sin embargo, las muestras FM presentaron discontinuidades y patrones de de-correlación (se indican con una elipse roja en Figura 6f).

Después de desenvolver todos los mapas de fase DHI y FD-OCT, un algoritmo temporal agrega los desplazamientos escalonados para obtener el mapa de deformación completa correspondiente al intervalo de 100 imágenes. La Figura 7 muestra los mapas DHI para cada grupo y género por pares. Las Figuras 7a, 7b, 7c y 7d muestran la anisotropía y viscoelasticidad típicas de un hueso. Aquí, la estructura del hueso se adapta continuamente a medida que la punta del SM se mueve durante la prueba. Sin embargo, esto es significativamente diferente en el grupo FM, donde se observa una deformación uniforme y constante (Figuras 7e y 7f), algo más cercano a una muestra isotrópica en lugar de una anisotrópica como el hueso.

Al recuperar la deformación máxima para cada hueso y método, es posible crear un gráfico para determinar si el método de preservación modifica la respuesta mecánica. Esto último se muestra en la Figura 8a, donde se observa que los desplazamientos superficiales e internos son diferentes. El análisis cuantitativo también mostró diferencias relacionadas con el género de los especímenes. Los huesos femeninos soportan mayores deformaciones antes de fracturarse en comparación con los huesos masculinos, tanto en la superficie como en la región interna (ver Figura 8b).

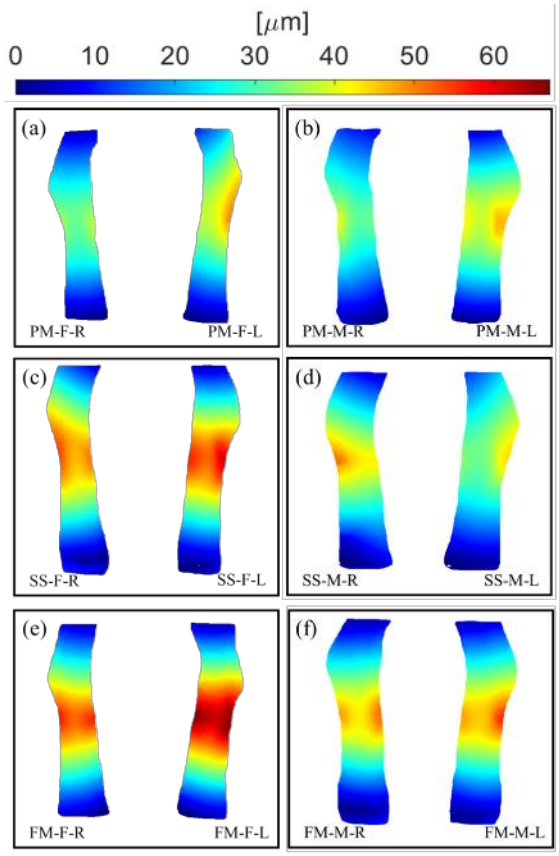


Figura 7. Deformación superficial total observada en los fémures justo antes de la fractura en hembras y machos, (a)(b) post mortem, (c)(d) solución salina y (e)(f) formol. Tomado de [18].

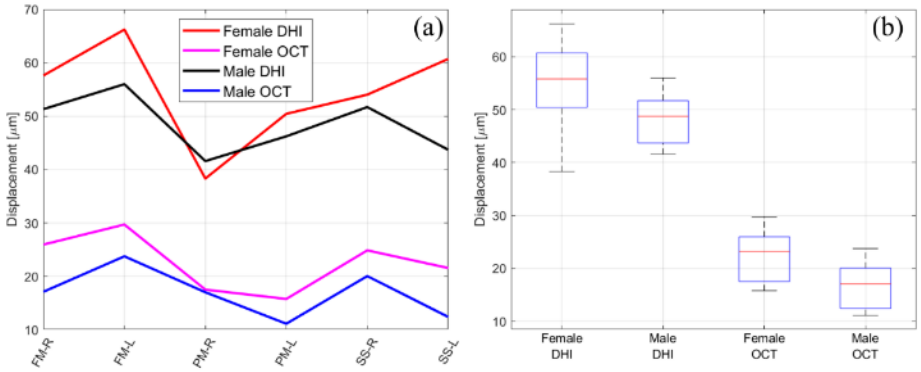


Figura 8. Comparación de (a) desplazamientos máximos y (b) resultados de género por método. Tomado de [18].

Con fines de comparación, se analizaron las muestras con espectroscopía Raman. Las Figuras 9a y 9b muestran los espectros Raman promedio de los huesos femorales masculinos y femeninos, respectivamente. Las señales obtenidas son muy similares a aquellas reportadas en estudios previos [17], donde destacan las principales bandas vibracionales asociadas al fosfato $(\nu 1)$ y al enlace C-H más fuerte a 960 cm-1 y 2945 cm-1, respectivamente. Las señales de los tres grupos (FM, SS y PM) de las Figuras 9a y 9b no muestran diferencias significativas en su perfil de intensidad. La Figura 9c muestra la respuesta espectral promedio para cada grupo sin distinción de género y es similar a las Figuras 9a y 9b. Esto indica que las alteraciones mecánicas observadas mediante DHI y FD-OCT no son fácilmente detectables mediante análisis moleculares puntuales.

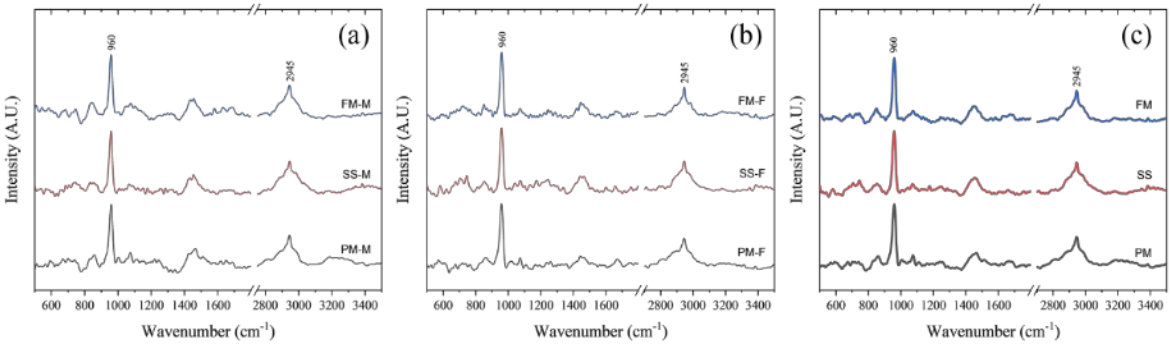


Figura 9. Espectros Raman promedio para (a) macho, (b) hembra y (c) promedio general. Los picos obtenidos en 960 cm^{-1} y 2945 cm^{-1} corresponden al fosfato v1 y a la línea vibracional C-H más intensa. Tomado de [18].

En conjunto, los resultados evidencian que las técnicas ópticas de campo completo poseen una alta sensibilidad para detectar modificaciones mecánicas inducidas por los medios de preservación, incluso cuando los cambios químicos son mínimos o inexistentes.

CONCLUSIONES

La preservación de muestras óseas influye significativamente sobre su respuesta mecánica durante pruebas biomecánicas de campo completo. Los resultados obtenidos demostraron que la solución salina conserva de manera adecuada el comportamiento viscoelástico y anisotrópico del hueso incluso después de 48 h de almacenamiento.

Por el contrario, el formol modifica la distribución de deformación y altera la respuesta mecánica natural del tejido, produciendo un comportamiento más uniforme y cercano al de un material isotrópico. Asimismo, las imágenes obtenidas mediante FD-OCT evidenciaron alteraciones estructurales en la médula ósea asociadas con este medio de preservación.

La combinación simultánea de DHI y FD-OCT permitió obtener una caracterización integral de la deformación superficial e interna del hueso, demostrando el potencial de estas técnicas para estudios biomecánicos avanzados en tejidos biológicos.

Finalmente, aunque la espectroscopía Raman no mostró diferencias moleculares significativas entre los grupos experimentales, las técnicas ópticas de campo completo sí detectaron cambios importantes en la respuesta mecánica. Esto resalta la importancia de emplear metodologías complementarias para la evaluación integral de tejidos biológicos preservados.

Los resultados sugieren que la solución salina constituye un medio de preservación más adecuado para muestras destinadas a análisis biomecánicos ex vivo, minimizando alteraciones en las propiedades mecánicas naturales del tejido óseo.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Vishnoi and G. Rajshekhar, “Rapid deformation analysis in digital holographic interferometry using graphics processing unit accelerated Wigner–Ville distribution,” Appl. Opt. Vol. 58, 2019, pp. 4420–4424.
2. G. A. Gómez-Méndez, A. Martínez-García, D. I. Serrano-García, et al., “Measurement in-plane deformations in electronic speckle pattern interferometry using phase-shifting modulated by polarization,” Opt. Commun. Vol. 498, 2021, pp. 127245.

3. J. Fu, F. Pierron, and P. D. Ruiz, “Elastic stiffness characterization using three-dimensional full-field deformation obtained with optical coherence tomography and digital volume correlation,” J. Biomed. Opt. Vol. 18, 2013, pp. 121512.
4. H. B. Motra, J. Hildebrand, and A. Dimmig-Osburg, “Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel,” Eng. Sci. Technol. Int. J. Vo.17, 2014, pp. 260–269.
5. M. Contaldo, A. Romano, F. Fiori, et al., “In vivo optical coherence tomography in oral cavity: an update,” J. Biol. Regulators Homeostatic Agents, Vol.36, 2022, pp. 57–65.
6. J. L. S. Acosta, F. M. Santoyo, J. M. F. Moreno, et al., “Study of skin aging effects induced by near UV radiation using time average digital holographic interferometry,” Opt. Laser Eng. Vol. 137, 2021, pp. 106345.
7. M. M. Barak, A. Sharir, and R. Shahar, “Optical metrology methods for mechanical testing of whole bones,” Veterinary J. vol. 180, 2009, pp. 7–14.
8. X. Feng, “Chemical and biochemical basis of cell-bone matrix interaction in health and disease,” Curr. Chem. Biol. Vol. 3, 2009, pp. 189–196.
9. E. Seeman, “Bone quality: the material and structural basis of bone strength,” J. Bone Mineral Metab. Vol. 26, 2008, pp. 1–8.
10. U. Stefan, B. Michael, and S. Werner, “Effects of three different preservation methods on the mechanical properties of human and bovine cortical bone,” Bone, vol. 47, 2010, pp. 1048–1053.
11. G. Zhang, X. Deng, F. Guan, et al., “The effect of storage time in saline solution on the material properties of cortical bone tissue,” Clin. Biomech. Vol. 57, 2018, pp. 56–66.
12. G. Frausto-Rea, M. H. de la Torre-Ibarra, R. F. Muñoz-Huerta y F. J. Casillas, “Mechanical test study in composites using digital holographic interferometry and optical coherence tomography simultaneously,” Applied Optics, vol. 59, 2020, pp. 857 – 865.
13. M. I. H. De la Torre, M. J. M. Flores, V. Piazza, E. D. H. Velazquez y V. H. Hernandez, “Concurrent optical inspection to boost characterization of plastic cortical bone under mechanical deformation,” Applied Optics, vol. 62, 2023, pp. 1483 – 1491.
14. “Ethical Guidelines for the Use of Animals in Research,” Published on 08/07/2019. https://www.forskningsetikk.no/en/guidelines/science-and-technology/ethical-guidelines-for-the-use-of-animals-in-research/
15. A. Azzam y W. Li, “An experimental investigation on the three-point bending behavior of composite laminate,” Global Conference on Polymer and Composite Materials, 2014, pp. 27–29.
16. J. D. Berrones-Guerrero, C. Frausto-Reyes, M. De la Torre, M. Ortiz-Morales, and J. M. Lopez-T., “Impacto n the Raman spectra of liquids when a polarized light source is used,” Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, vol. 272, 2022, pp. 121001.
17. X. Bi, C. A. Patil, C. C. Lynch, G. M. Pharr, A. Mahadevan-Jansen and J. S. Nyman, “Raman and mechanical properties correlate at whole bone- and tissue-levels in a genetic mouse model,” Journal of Biomechanics, vol. 44, 2011, pp. 297 – 303.
18. B. M. Guzman V., M. H. De La Torre I., y C. Frausto-Reyes, “Impact of the preservation media on ex vivo bone samples for full field mechanical testing”, Appl. Opt., vol. 63, 14, 2024, pp. 3745-3752.

LAS TOLVANERAS DEL LAGO DE CUITZEO, MICHOACÁN: ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y SOCIAL

Carolina Isabel Reyes Toscano, Rafael Trueba Regalado, Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, Dulce María Bocanegra Ramírez, Raúl Cortés Martínez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
1902645humich.mx

RESUMEN

Los humedales son ecosistemas vitales para la regulación climática y la biodiversidad, sin embargo, enfrentan un grave deterioro por factores antropogénicos y climáticos. El Lago de Cuitzeo, el segundo más grande de México, presenta un proceso crítico de desecación, particularmente en su zona oeste. Esta degradación, atribuida a actividades socioproductivas y descargas residuales, ha provocado que durante los meses de estiaje los contaminantes se asienten en el lecho seco. La acción de los vientos genera tolvaneras que transportan partículas finas hacia las comunidades ribereñas de la Región Oeste del Lago de Cuitzeo (ROLC), representando un problema ambiental y de salud pública emergente. El objetivo de este estudio es caracterizar las condiciones socioambientales de las tolvaneras en el Lago de Cuitzeo, Michoacán, México. El enfoque metodológico de la investigación es mixto. En el componente ambiental, se seleccionaron 4 sitios de estudio para recolectar sedimentos y polvo atmosférico. Se analizaron parámetros fisicoquímicos como pH (EPA 9045D), materia orgánica y color. Las concentraciones totales de elementos traza (Cu, Li, Zn, Fe, Ni) se determinaron mediante digestión ácida (EPA3050B) y se evaluaron frente a estándares internacionales (CCME, NOAA, EPA) ante la falta de una norma mexicana para sedimentos. En el componente social, se caracterizaron cinco variables clave (población, educación, salud, entre otras) utilizando datos de los Censos del INEGI años 2010 – 2020. Los análisis fisicoquímicos clasifican al sustrato como “fuertemente alcalino”, con valores de pH entre 11.23 y 12.2 tanto en sedimentos como en tolvaneras, la materia orgánica en las muestras varió del 0.67% al 3.16%. En cuanto a elementos traza, se hallaron niveles alarmantes de Zinc (Zn), alcanzando hasta 870 mg/kg en tolvaneras, lo que supera ampliamente el límite PEL de la CCME (315 mg/kg) y los umbrales de la NOAA y EPA. El Niquel (Ni) mostró concentraciones de hasta 2,140 mg/kg y el Cobre (Cu) de hasta 22.3 mg/kg, ambos excediendo los límites SEL y LEL de la NOAA. Socialmente, se identificó un crecimiento poblacional moderado, pero con graves carencias: el aumento del empleo informal y la falta de acceso a servicios de salud dejan a los habitantes sin protección ante la toxicidad demostrada en el polvo de las tolvaneras.

INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas vitales para el abastecimiento regional de agua, el control de inundaciones, la regulación del clima y la preservación de la biodiversidad (Fang et al., 2022). Sin embargo, estos ecosistemas han sufrido un acelerado deterioro a causa del cambio en el uso del suelo, la contaminación agrícola e industrial; el sobrepastoreo, las sequías, la urbanización y la sobreexplotación de aguas subterráneas. Esta degradación compromete servicios ecosistémicos fundamentales, haciendo urgente su restauración (Trueba-Regalado et al., 2025).

El Lago de Cuitzeo es el segundo lago natural más grande de México y uno de los cuerpos de agua más estudiados en sus dimensiones ambiental, cultural, social y económica. Se localiza al norte del estado de Michoacán, México (Ortiz-Paniagua et al., 2019), dentro de la región hidrológica RH 12 Lerma-Santiago (Arroyo-Sesento et al., 2018) y su importancia regional radica en la regulación climática de la cuenca, el sustento de biodiversidad y su aporte a la economía local mediante actividades como la pesca, que beneficia directamente a 1,200 familias (Franco et al., 2011).

La desecación del Vaso Oeste es consecuencia de un equilibrio sistémico en la cuenca: el cambio acelerado de uso de suelo, la deforestación, la expansión de monocultivos de alto requerimiento hídrico y la sobreexplotación de los afluentes han reducido drásticamente el caudal que llega al lago (Mendoza et al., 2007; Pimienta Ramírez et al., 2025). Las descargas residuales de la ciudad de Morelia agravan el deterioro ambiental (Ortiz-Paniagua et al., 2019). Desde el año 2000, el Vaso Oeste se transforma en una cuenca de evaporación con periodos de desecación total, con febrero como el mes más seco (5.7 mm promedio mensual) (Trueba-Regalado, 2019).

Durante la desecación, los contaminantes presentes en el agua -arsénico, plomo, níquel, cadmio, cobre y zinc- se asientan en el lecho seco (Trueba-Regalado, 2019). La velocidad y orientación de los vientos generan tolvaneras que cubren a las comunidades ribereñas de Capacho, Doctor Miguel Silva y Jéruco, causando enfermedades respiratorias, gastrointestinales, dermatológicas y oftalmológicas (Ortiz-Paniagua et al., 2019). El presente trabajo busca aportar información científica sobre las características fisicoquímicas y los efectos sociales de este problema ambiental emergente.

TEORÍA

Lagos y desecación

Los lagos son ecosistemas de gran relevancia; poseen un volumen total mundial de 181.9×10^3 km^3 y una superficie de 2.67×10^6 km^2, representando el 1.8% de la superficie terrestre. Muchos han sufrido cambios rápidos por el cambio climático y las actividades humanas: el Lago Chad ha perdido más del 90% de su superficie y el Mar de Aral ha reducido su volumen en un 90% (Gao et al., 2025). Los lagos terminales de todo el mundo enfrentan numerosos factores de estrés que provocan la desecación con graves consecuencias para la biodiversidad y las comunidades cercanas (Grineski et al., 2024). En México, el Lago de Cuitzeo es un ejemplo crítico de este proceso.

Sedimentos y contaminación por elementos traza

Los sedimentos lacustres constituyen un importante compartimiento ecológico que actúa como reservorio de contaminantes, incluyendo nutrientes, hidrocarburos, plaguicidas y metales pesados (Fe, Mn, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg, As, Se) (Reyes Toscano, 2023). Con base en parámetros fisicoquímicos del entorno -pH, potencial redox (Eh) y temperatura-, los elementos traza pueden ser devueltos a la columna de agua, representando una fuente potencial de contaminación (Akono et al., 2022) que amenaza organismos acuáticos y la salud humana mediante biomagnificación (Fang et al., 2022).

La biodisponibilidad y toxicidad de los elementos traza depende de su forma química en los sedimentos y está relacionada con el pH y el contenido de materia orgánica (Reyes Toscano, 2023). El cobre (Cu) y el zinc (Zn) en bajas concentraciones son esenciales para los organismos, pero a altas concentraciones resultan tóxicos; el plomo (Pb), el cromo (Cr) y el cadmio (Cd) tienen efectos nocivos incluso en concentraciones muy bajas (Akono et al., 2022). Los niveles más altos de elementos traza en los ecosistemas acuáticos se encuentran generalmente en los sedimentos y en los organismos, no en el agua (Villalobos-Castañeda et al., 2016).

Tolvaneras

Cuando los niveles de agua de los lagos disminuyen drásticamente, los sedimentos del lecho quedan expuestos. Los lechos lacustres actúan como reservorios de la acumulación histórica de metales pesados de fuentes antropogénicas y se convierten en fuentes críticas de emisión de polvo a nivel regional propiciando el desarrollo de tolvaneras (Gao et al., 2025). Las tormentas de polvo son consideradas peligros naturales y representan una de las fuentes más comunes de material particulado, impulsadas por vientos superiores a los 37 km/h (Middleton, 2019). El material particulado se clasifica por tamaño en arcilla (< 2 μm), limo (2 – 63 μm) y arena muy fina (63 – 93 μm) (Al-Dousari et al., 2025).

Durante un evento de tolvanera, las concentraciones de PM_{10} Y $PM_{2.5}$ suelen rebasar los umbrales de seguridad de la OMS ($PM_{2.5}$ media anual de 10 μg/m^3, PM_{10} media anual de 20 μg/m^3)

(Aghababaeian et al., 2021). La exposición prolongada incrementa el riesgo toxicológico por la resuspensión de compuestos potencialmente cancerígenos y elementos potencialmente tóxicos (EPT) como cobalto, cadmio, zinc y arsénico (Al-Dousari et al., 2025). Casi todas las partículas de las tolvaneras pueden ingresar al tracto respiratorio y las más pequeñas penetran al tejido pulmonar profundo, causando trastornos respiratorios, cardiovasculares, cutáneos, sanguíneos e inmunológicos (Aghababaeian et al., 2021).

Lineamientos de calidad de sedimentos (SGQ)

En ausencia de normativa mexicana específica para sedimentos, este estudio se apoya en los Lineamientos de Calidad de Sedimentos (SQG) del Consejo Canadiense de Administración del Ambiente (CCME), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Epa) (Reyes Toscano, 2023). Estos lineamientos establecen umbrales como el Nivel de Efecto Umbral (TEL/ISQG) y el Nivel de Efecto Probable (PEL) que permiten evaluar el riesgo ecológico asociado a las concentraciones de metales en sedimentos, los cuales se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 11. Límites establecidos por agencias ambientales para la concentración de metales pesados en sedimentos

Normatividad		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe
CCME	ISQG	0.6	37.3	35.7	-	35	123	-
	PEL	3.5	90	197	-	91.3	315	-
NOAA		0.1-0.3	7-13	10-25	9.9	4-17	7-38	-
EPA	TEL	0.596	37.3	35.7	18	35	123	-
	LEL	0.6	26	16	16	31	120	-

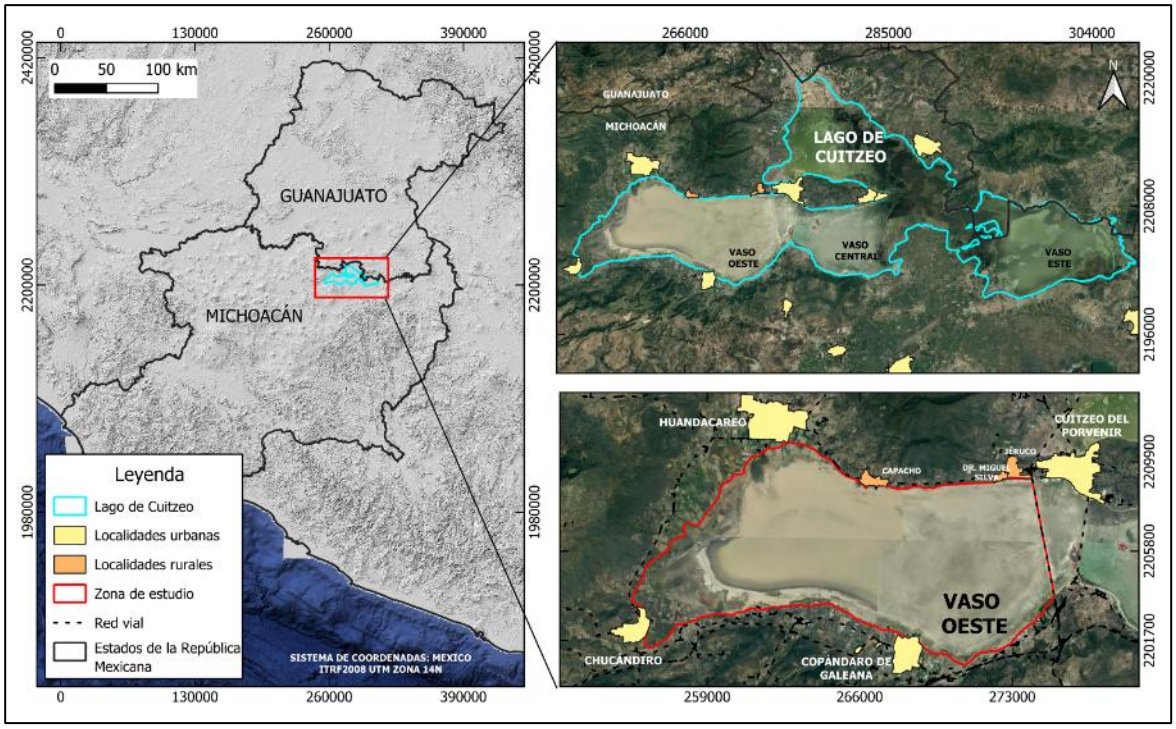
Fuente: Elaboración propia con datos de Reyes-Toscano (2023).

PARTE EXPERIMENTAL

Área de estudio

En el Lago de Cuitzeo se localiza al noroeste del estado de Michoacán y al sureste de Guanajuato, aproximadamente 1,800 msnm (Sánchez-Blanco & Guevara-Féfer, 2013) y a 20 km al norte de Morelia, entre los paralelos 19°53’15” y 20°04’30" de latitud norte y los meridianos 100°50’20” de longitud de oeste (Moreno & Retana, 1995). Su superficie es de aproximadamente 400 km^2 y abarca municipios de Michoacán y Guanajuato (Arroyo-Sesento et al., 2018). La zona de estudio corresponde a la Región Oeste del Lago de Cuitzeo (ROLC), conformada por Huandacareo, Chucándiro, Copándaro y Cuitzeo. En la **Figura 1** se observa la localización geográfica del Lago.

Figura 21. Localización geográfica de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales del INEGI (2024) y del SCINCE (2020).

Geológicamente, el lago se localiza dentro del Sistema Volcánico Transversal, en una cuenca endorreica resultado de fenómenos tectónicos y volcánicos del Plioceno, con predominancia de rocas ígneas del Terciario y Cuaternario (Moreno & Retana, 1995). El clima dominante es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 16.8 – 18.6°C y precipitación de 669.8 – 959 mm anuales (Sánchez-Blanco & Guevara-Féfer, 2013).

Caracterización socioeconómica de la ROLC

La caracterización socioeconómica es un informe que reúne la información necesaria para dar a conocer las condiciones en que viven las familias de la zona determinada, así como el estado ambiental del territorio. Resulta de gran importancia debido a que permite determinar las particularidades de las estructuras políticas, sociales, culturales y territoriales encargadas de entender y atender la situación real de la población (González Carrillo, 2020). Para el caso de esta investigación, la caracterización socioeconómica permite contextualizar la pérdida de bienestar de la población debido a las tolvaneras.

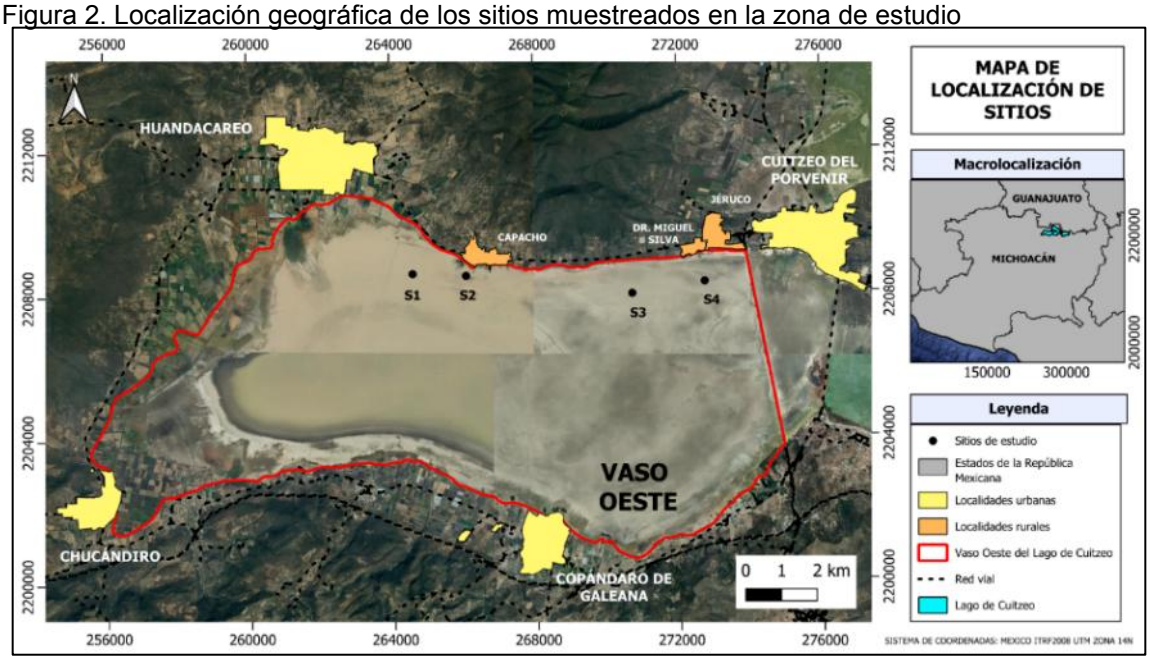
Selección de sitios y colecta de muestras

Se seleccionaron cuatro sitios de muestreo ubicados en la ROLC donde existe presencia documentada de tolvaneras posiblemente relacionadas con afectaciones a la salud de las comunidades ribereñas. La ubicación de la zona de estudio y de los sitios de muestreo se observan en la **Tabla 2** y en la **Figura 2**.

Tabla 12. Coordenadas de los sitios de estudio

Sitios	Coordenadas geográficas
Sitio 1	19.959388, -101.249409
Sitio 2	19.958947, -101.235157
Sitio 3	19.954729, -101.190806
Sitio 4	19.957839, -101.171481

Figura 2. Localización geográfica de los sitios muestreados en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales del INEGI (2024) y del SCINCE (2020).

Análisis de parámetros fisicoquímicos

El pH se midió mediante el método electrométrico 9045D (USEPA, 2001) (**Figura 3**). El color se determinó utilizando las tablas de Munsell para suelos, comparando el color en seco con los parámetros de matiz (hue), brillo (value) e intensidad (chroma) (**Figura 4**). La materia orgánica (MO) fue cuantificada mediante el método volumétrico establecido en la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2000) (**Figura 5**). Cabe señalar que en México no existe normatividad específica para sedimentos, por lo que los análisis de materia orgánica se realizaron bajo los estándares de suelos.

Figura 3. Método 9045D

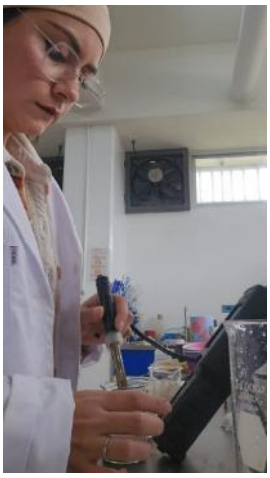


Figura 4. Carta de Munsell



Figura 5. Método volumétrico

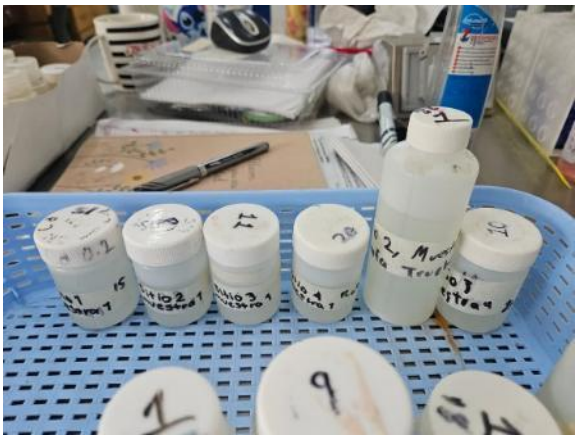


Fuente: Imágenes propias.

Análisis de concentración total de elementos traza

Para la determinación de la concentración total de elementos traza (Li, Cu, Zn, Ni, Fe, Cr, Pb y Cd) se aplicó el método EPA 3050B de digestión ácida de sedimentos y suelos (USEPA, 2001) (**Figura 6**). Las concentraciones fueron determinadas por espectroscopía de absorción atómica. Los elementos Cr, Pb y Cd se encontraron por debajo del límite de detección del método. Los resultados fueron comparados con los Lineamientos de Calidad de Sedimentos de la CCME, NOAA y EPA.

Figura 6. Digestiones ácidas de las muestras



Fuente: Imagen propia.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica

Los análisis realizados a las muestras de sedimentos superficiales y polvo de tolvaneras revelaron una homogeneidad en sus propiedades fisicoquímicas. El pH de todas las muestras analizadas presentó una marcada tendencia básica, con valores que oscilaron de manera general entre 11.2 y 12.2. De acuerdo con la normatividad mexicana vigente (NOM-021-RECNAT-2000), estos niveles clasifican el material evaluado en la categoría de “fuertemente alcalino”.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos de color y materia orgánica, las muestras exhibieron una alternancia de coloraciones que varían desde tonos café pálido y grisáceos hasta matices marrón-amarillos. Los niveles de materia orgánica determinados se mantuvieron consistentemente bajos, situándose en su mayoría por debajo del 3.2%.

Concentración total de elementos traza

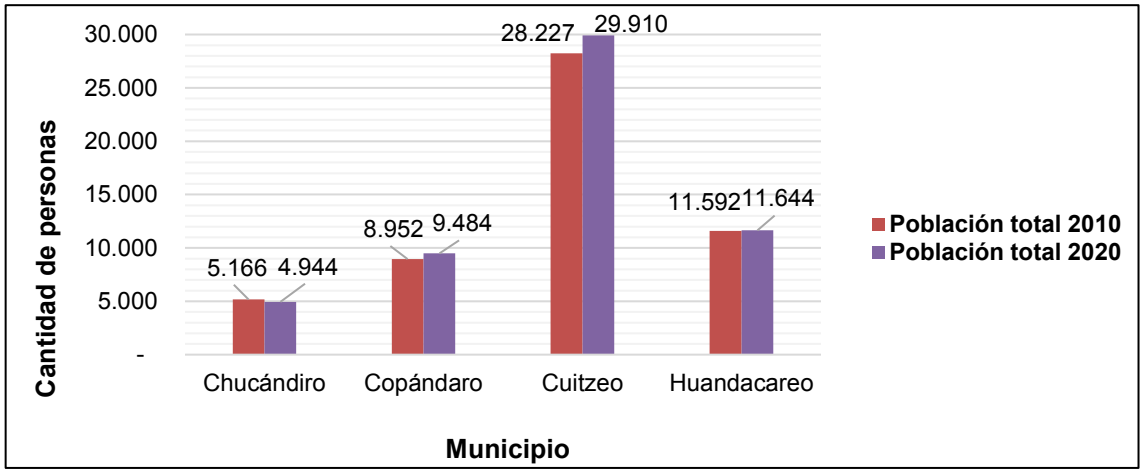
El análisis de elementos traza arrojó un comportamiento diferenciado dependiendo del metal evaluado:

- **Elementos no detectados:** Las concentraciones de Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) se mantuvieron de manera general por debajo de los límites de detección del método analítico en todas las muestras.
- **Elementos con concentraciones de bajo riesgo:**
  - El **Litio (Li)** mostró una distribución espacial homogénea en el lago. Su enriquecimiento se asocia principalmente a factores estrictamente geogénicos.
  - El **Cr (Cromo)** se detectó en niveles mínimos que se ubican por debajo de los umbrales de riesgo ecológico de referencias internacionales (como EPA y CCME) e inclusive por debajo del fondo geoquímico natural del lago.
- **Elementos con enriquecimiento significativo:**
  - El **Hierro (Fe)** se identificó como el elemento más abundante en la composición de los sedimentos y polvos analizados, registrando concentraciones marcadamente elevadas que superan los fondos geoquímicos locales de la cuenca.
  - Tanto el **Zinc (Zn)** como el **Níquel (Ni)** registraron acumulaciones considerables. En el caso del Níquel, los valores superaron de forma generalizada los límites permisibles internacionales (PEL de la CCME y TEL de la EPA), con magnitudes que multiplican significativamente el fondo geoquímico regional. Aunque una porción importante de estos metales proviene de la meteorización de las rocas locales, las altas concentraciones detectadas (particularmente en zonas de tolvaneras y ciertos sedimentos) sugieren posibles aportes de fuentes antropogénicas difusas acopladas al origen natural.

Caracterización socioeconómica de la ROLC

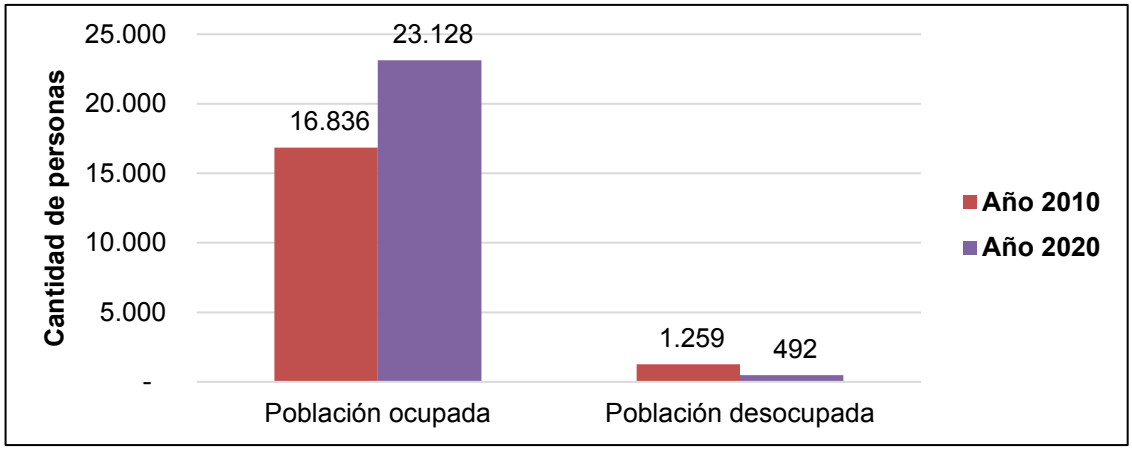
Se analizaron para cada municipio cinco variables: población total población económicamente activa, población con derecho a servicios de salud, educación y condiciones de las viviendas; para los años 2010 – 2020. Toda la información utilizada para la realización de tablas se recopiló una fuente (Quezada-Ponce & Trueba-Regalado, 2025), la cual fue obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Censos de Población y Vivienda 2010 y 2020. De la **Figura 7** a la **Figura 11** y en la **Tabla 3**, se muestran los resultados de esta caracterización socioeconómica.

Figura 7. Población total de la ROLC (2010 - 2020)



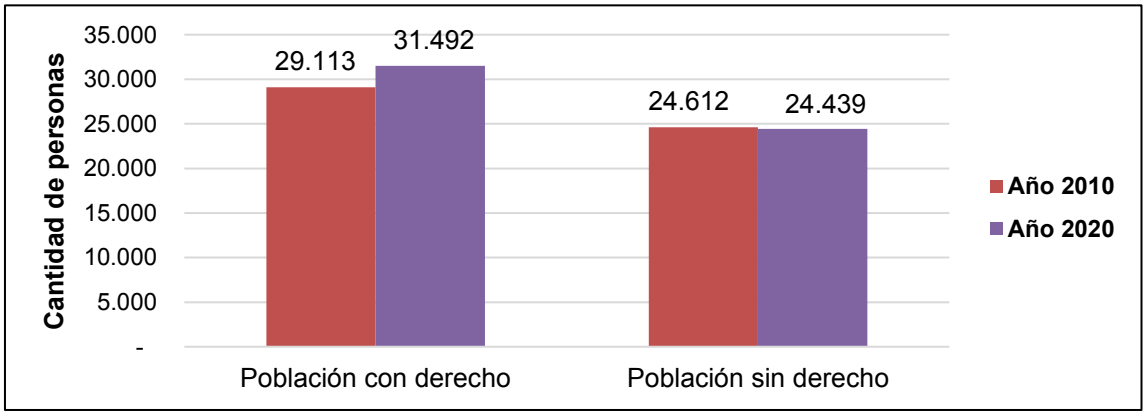
Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Figura 8. Población económicamente activa



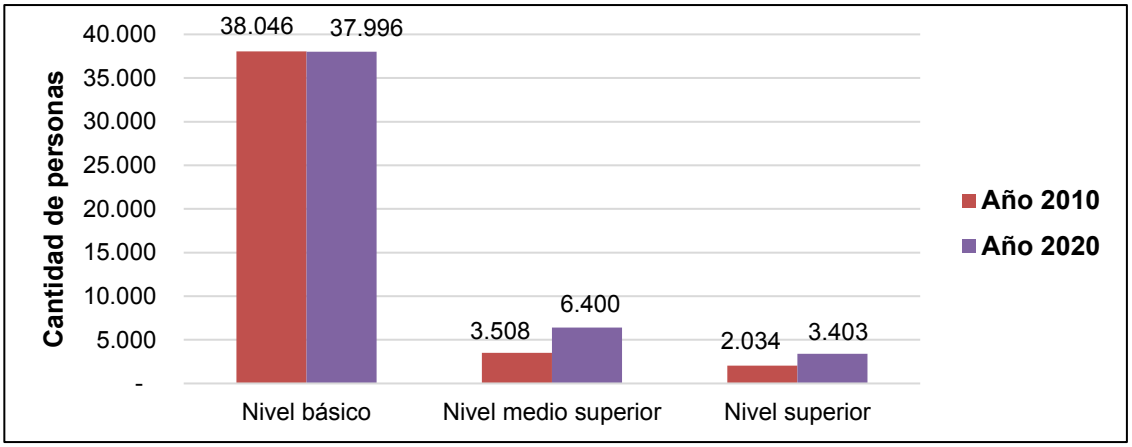
Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Figura 9. Derechohabientes



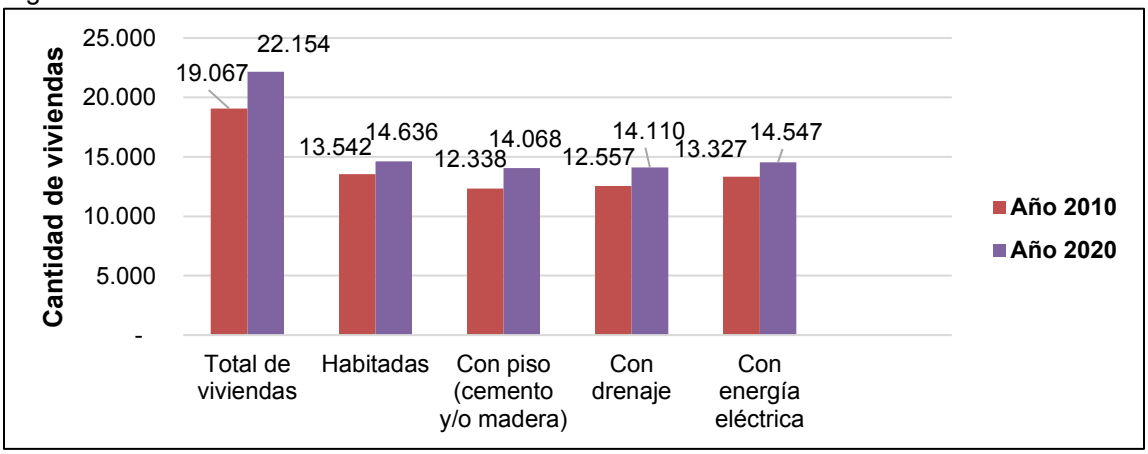
Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Figura 10. Nivel de educación



Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Figura 11. Condiciones de la vivienda



Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Tabla 13. Población del Estado y de la ROLC (2010 – 2020)

	Año 2010			Año 2020			Tasa de crecimiento de la población
	Habitantes femeninas	Habitantes masculinos	Total	Habitantes femeninas	Habitantes masculinos	Total	
Total en la región	28,774	25,163	53,937	29,124	26,858	55,982	3.8%
Total en el estado	-		4,351,037	-		4,748,846	9.1%

Fuente: Elaboración propia con datos de Quezada-Ponce & Trueba-Regalado (2025).

Entre 2010 y 2020, la región tuvo un crecimiento demográfico lento del 3.8% (55,982 habitantes), quedando rezagada frente al promedio del estado. Cuitzeo se consolidó como el municipio más poblado, mientras que Chucándiro decreció debido a la falta de oportunidades locales. Este aumento poblacional generalizado incrementa el número de personas expuestas a las tolvaneras.

A pesar del bajo crecimiento demográfico, la población ocupada aumentó con fuerza un 35% (23,128 personas), impulsada por una inserción masiva de las mujeres al mercado laboral y una baja en el desempleo. Sin embargo, la afiliación a servicios de salud solo creció un 8%, lo que revela que la creación de empleo se dio principalmente en la informalidad, dejando a una gran parte de la población desprotegida ante las enfermedades provocadas por el polvo del lago.

En el aspecto educativo, la región avanzó significativamente en los niveles media superior y superior, casi duplicando el número de técnicos y universitarios, lo que dota a la población de mejores herramientas para enfrentar la crisis ambiental. finalmente, en vivienda se detectó que el 34% de las casas están desocupadas, aunque los hogares habitados mejoraron sustancialmente en servicios básicos como piso firme, luz y drenaje.

CONCLUSIONES

Los sedimentos superficiales y el polvo de tolvanera del Lago de Cuitzeo se caracterizan de manera homogénea por presentar condiciones fuertemente alcalinas. Esta propiedad, vinculada a la naturaleza salina de la cuenca, actúa como un factor crítico que favorece de forma natural la retención e incremento en el potencial de acumulación de elementos traza en el entorno.

Las concentraciones de Cu reflejan un fondo geoquímico natural sin evidencia de contaminación antropogénica. Por el contrario, las concentraciones de Zn y Ni superan ampliamente los umbrales normativos internacionales (CCME, NOAA y EPA), representando un riesgo ecológico significativo y un posible riesgo para la salud humana mediante inhalación, ingesta o por contacto con la piel.

Finalmente, la caracterización socioeconómica evidenció que la Región Oeste del Lago de Cuitzeo podría incrementar la vulnerabilidad de las comunidades ante los efectos de las tolvaneras. Por ello, la problemática debe abordarse desde una perspectiva socioambiental integral que considere simultáneamente la restauración del ecosistema lacustre y la protección de la salud de la población.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aghababaeian, H., Ostadtaghizadeh, A., Ardalan, A., Asgary, A., Akbary, M., Yekaninejad, M. S., & Stephens, C. (2021). Global Health Impacts of Dust Storms: A Systematic Review. *Environmental Health Insights*, *15*, 11786302211018390. https://doi.org/10.1177/11786302211018390
2. Akono, D. F., Assomo, P. S., Ntsama Atangana, J., Nkongho, A. E., Belinga, C. B., & Ekomane, E. (2022). Assessment of traces metals in sediment from Ebolowa Municipal Lake basin (central-africa): Potential risk and provenance. *Heliyon*, *8*(8), e10186. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10186
3. Al-Dousari, A., Al-Khalaifah, H., Abbas, S., Alahmad, B., Omar, A., Koutrakis, P., Al-Enezi, D., Al-Dousari, N., Al-Ateeqi, A., Alshareedah, A., Al-Nassar, W., & Alsayegh, M. (2025). Integrating Health and Economic Perspectives: A Comprehensive Review of Dust Mitigation Policies. *Earth Systems and Environment*. https://doi.org/10.1007/s41748-025-00650-x
4. Arroyo-Sesento, L. E., Hernández-Morales, R., Ortega-Murillo, M. del R., Jiménez-Santiago, P., & Martínez-Martínez, M. (2018). Análisis limnológico del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, *9*(21), 885–896.
5. Cram Heydrich, S., Galicia Sarmiento, L., & Israde-Alcántara, I. (Eds.). (2010). *Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental* (1. ed). Universidad Nacional Autónoma de México Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

6. Dugamin, E. J. M., Cathelineau, M., Boiron, M.-C., Richard, A., & Despinois, F. (2023). Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters. *Chemical Geology*, *635*, 121626. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121626
7. Fang, T., Yang, K., Wang, H., Fang, H., Liang, Y., Zhao, X., Gao, N., Li, J., Lu, W., & Cui, K. (2022). Trace metals in sediment from Chaohu Lake in China: Bioavailability and probabilistic risk assessment. *Science of The Total Environment*, *849*, 157862. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157862
8. Franco, C., Galicia, L., Durand, L., & Cram, S. (2011). *Análisis del impacto de las políticas ambientales en el lago de Cuitzeo (1940-2010)*.
9. Gao, Q., Chen, G., Lu, X., Chen, J., Zhang, H., & Wang, X. (2025). *Toxic Dust Emission from Drought-Exposed Lakebeds – A New Air Pollution Threat from Dried Lakes*. Aerosols/Atmospheric Modelling and Data Analysis/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions). https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-596
10. González Carrillo, V. E. G. (2020). *Caracterización socio-económica-ambiental de la comunidad de Joa-Jipijapa* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
11. Grineski, S. E., Mallia, D. V., Collins, T. W., Araos, M., Lin, J. C., Anderegg, W. R. L., & Perry, K. (2024). Harmful dust from drying lakes: Preserving Great Salt Lake (USA) water levels decreases ambient dust and racial disparities in population exposure. *One Earth*, *7*(6), 1056–1067. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.05.006
12. Hosseinpoor, S., Habibi, S., & Mohammadi, A. (2024). Understanding heavy metal contamination in the vicinity of Lake Urmia, NW Iran: Environmental and health Perspectives. *Heliyon*, *10*(13), e34198. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34198
13. Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., & Ortega-Murillo, R. (2002). Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica*, *12*(1).
14. Liu, D., Wang, X., Nie, L., Zhang, B., Zhou, J., Liu, H., & Wang, W. (2025). Nickel distribution in soils and its relationship with lithology, mineralization and geochemical landscape across mainland China. *Ore Geology Reviews*, *178*, 106476. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.106476
15. Mendoza, M. E., Bocco, G., Granados, E. L., & Bravo, M. (2007). *Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico*.
16. Middleton, N. (2019). Variability and Trends in Dust Storm Frequency on Decadal Timescales: Climatic Drivers and Human Impacts. *Geosciences*, *9*(6), 261. https://doi.org/10.3390/geosciences9060261
17. Moreno, J. R., & Retana, A. N. (1995). FLORA Y VEGETACION ACUATICAS DEL LAGO DE CUITZEO, MICHOACAN, MEXICO. *Acta Botánica Mexicana*.
18. Ortiz-Paniagua, C. F., Regalado, R. T., & Martínez-Paz, J. M. (2019). EXTERNALIDADES Y DESAFÍOS DE LAS POLÍTICAS DE DESARROLLO REGIONAL SUSTENTABLE EN LA RIBERA DEL LAGO DE CUITZEO. En *Regiones, desplazamientos y geopolítica: Agenda pública para el desarrollo territorial: II*.
19. Pimienta Ramírez, L., López Granados, E. M., & Reyes Abrego, G. A. (2025). Análisis del cambio de uso del suelo agrícola en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán México. *Ecosistemas*, 2895. https://doi.org/10.7818/ECOS.2895
20. Quezada-Ponce, A. G., & Trueba-Regalado, R. (2025). Diagnóstico de los aspectos socioeconómicos territoriales de la cuenca del Lago de Cuitzeo. En *Avances Científicos y Tecnológicos en México II* (pp. 178–191). Temacilli.
21. Reyes Toscano, C. A. (2023). *Estudio de la química y calidad del agua y sedimentos del río Duero en Michoacán* [Tesis de Doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de México.
22. Sánchez-Blanco, J., & Guevara-Féfer, F. (2013). Plantas arvenses asociadas a cultivos de maíz de temporal en suelos salinos de la ribera del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botanica Mexicana*, (105), 107–129. https://doi.org/10.21829/abm105.2013.227
23. Schulze, D. G., Nagel, J. L., Van Scoyoc, G. E., Henderson, T. L., Baumgardner, M. F., & Stott, D. E. (1993). Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors. En J. M. Bigham & E. J. Ciolkosz (Eds.), *SSSA Special Publications* (1a ed., Vol. 31, pp. 71–90). Wiley. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c5

24. Trueba-Regalado, R. (2019). *Valoración económica de las externalidades negativas en salud para la región oeste del lago de cuitzeo* [Tesis de Doctorado]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
25. Trueba-Regalado, R., Albaladejo-García, J. A., Chacón-Torres, A., Ortiz-Paniagua, C. F., & Martínez-Paz, J. M. (2025). Economic Valuation of the Public Health Impacts of Wetland Degradation: The Case of Lake Cuitzeo (Mexico). *Land*, *14*(9), 1908. https://doi.org/10.3390/land14091908
26. Villalobos-Castañeda, B., Cortés-Martínez, R., Segovia, N., Buenrostro-Delgado, O., Morton-Bermea, O., & Alfaro-Cuevas-Villanueva, R. (2016). Distribution and enrichment of trace metals and arsenic at the upper layer of sediments from Lerma River in La Piedad, Mexico: Case history. *Environmental Earth Sciences*, *75*(23), 1490. https://doi.org/10.1007/s12665-016-6251-8
27. Zhao, S., Zhao, Y., Cui, Z., Zhang, H., & Zhang, J. (2024). Effect of pH, Temperature, and Salinity Levels on Heavy Metal Fraction in Lake Sediments. *Toxics*, *12*(7), 494. https://doi.org/10.3390/toxics12070494

EFECTO DE LOS PROTOCOLOS DE DESCELULARIZACIÓN EN LAS PROPIEDADES ESTRUCTURALES Y FUNCIONALES DE ANDAMIOS DE MEMBRANA AMNIÓTICA DESCELULARIZADA

Paulina Alicia Irais Hernández-Becerra[1,2,*], Ricardo A. Alcántara-Moreno[2], Guadalupe H. Luévano-Colmenero[2,3,4], Esthela P. García-Tejada[2], Silvia Díaz-Sandoval[4], Nayeli Alva-Murillo[3], Isabel Delgadillo-Holtfort[2], J. Mauricio Flores-Moreno[1], Birzabith Mendoza-Novelo[2]

[1]Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., Laboratorio Colaborativo de Microscopía Óptica, [2]División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, [3]División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, [4]Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Campus Guanajuato, Instituto Politécnico Nacional.

*pai.hernandez@cio.mx

RESUMEN

En las últimas décadas, los bioandamios derivados de la matriz extracelular (ECM) han surgido como materiales fundamentales en la ingeniería de tejidos. Para estas aplicaciones, se han desarrollado y evaluado técnicas para obtener ECM funcional en tejidos blandos y duros, como la piel y el hueso. Dentro de los tejidos blandos se encuentra la membrana amniótica humana (hAM), que ha sido de especial interés en ingeniería de tejidos por su accesibilidad. Esta matriz, proveniente de la placenta, tiene un alto contenido en colágeno y ofrece características que la hacen ideal como andamio biológico, ya que es biocompatible y posee propiedades antiinflamatorias, antibacterianas, antivirales y analgésicas, demostrando eficacia en la cicatrización de heridas. En clínica, la hAM se ha empleado especialmente en oftalmología y dermatología en trasplantes de córnea y piel. Un paso clave para su uso es el proceso de descelularización, que elimina componentes celulares a fin de minimizar el rechazo inmunológico y, al mismo tiempo, preserva componentes de la ECM. En el presente estudio, se procesaron 12 especímenes de hAM usando dos protocolos de descelularización: hidrólisis de enlaces peptídicos con tripsina asistida por EDTA (En) y disrupción de membrana celular mediante un detergente no iónico combinado con hinchamiento alcalino reversible (SD) y con tratamiento con nucleasas. Cada protocolo fue evaluado analizando la composición bioquímica residual mediante cuantificación de ADN, medición del contenido de glicosaminoglicanos sulfatados (sGAG) y la cuantificación de colágeno tipo IV, fibronectina y lumicán liberados. Además, se utilizó microscopía de generación de segundo armónico (SHG) para obtener imágenes de la microestructura superficial de los tejidos hAM descelularizados, evaluando así la ultraestructura de los bioandamios considerando que el colágeno presenta propiedades ópticas no lineales. Posteriormente, se evaluaron las propiedades mecánicas en hAM descelularizada y liofilizada siguiendo un protocolo de tres pasos: ciclos de carga-descarga, relajación y prueba de tensión al fallo. Después de estos procedimientos, se cultivaron células epiteliales vaginales VK2/E6E7 sobre los bioandamios de hAM a fin de evaluar la actividad metabólica y la viabilidad celular a las 96 horas de cultivo. Posteriormente, se empleó microscopía de excitación de dos fotones (TPEF) para analizar la morfología de células epiteliales VK2/E6E7 cultivadas sobre los andamios de hAM descelularizados. Los resultados indican que los bioandamios de hAM presentan una gran variabilidad de donante a donante, lo que impacta significativamente la composición y la calidad de los biomateriales procesados. Además, se observó que la elección del proceso de descelularización es clave para modificar las propiedades mecánicas, ya que cada protocolo proporciona diferentes perfiles mecánicos. Finalmente, se evidenció que las características de la superficie, incluyendo rugosidad, porosidad y composición química, ejercen una influencia significativa en la capacidad de adhesión de las células epiteliales, así como en la morfología de los cultivos celulares, los cuales dependen de las características superficiales determinadas por la porción anatómica de la cual se extrajo el tejido.

INTRODUCCIÓN

La membrana amniótica humana (hAM) es un tejido semitransparente, rico en colágeno y de 0.07-0.3 mm de espesor, constituido por una capa epitelial, una membrana basal y una capa estromal (compacta, fibroblastos y esponjosa) [1-3]. Sus aplicaciones clínicas incluyen trasplantes oftalmológicos [4,5] y productos de ingeniería tisular como sustitutos dérmicos, regeneración tendinosa, urología reconstructiva, tejidos vasculares [6-8], sustentadas en su capacidad de modular la producción y el depósito de colágeno [9,10]. Pese a estas ventajas, existen limitaciones por la respuesta inmunogénica y de rechazo asociada a aloinjertos o xenoinjertos [7,8], lo que justifica el uso de protocolos de descelularización que conserven la ECM como soporte estructural, sitio de adhesión y reservorio de señales inductoras del remodelado.

La resistencia tensil de la membrana corioamniótica está determinada principalmente por la membrana amniótica (AM) [11,12], con propiedades de falla isotrópicas o anisotrópicas según la porción placentaria (proximal) o periférica (distal) [13]. La organización en haces de proteínas de la ECM, las fibras elásticas dispersas y el grado de anisotropía del colágeno definen un comportamiento mecánico no lineal y modulan su rigidez [14-16]. Los procedimientos de remoción celular alteran la composición de la ECM: métodos mecánicos dañan la membrana basal y enzimas como dispasa o tripsina afectan al colágeno, fibronectinas y lamininas [17,18]. Por su parte, el tratamiento alcalino reversible induce hinchamiento que abre espacios interfibrilares sin comprometer la arquitectura tridimensional [19,20].

El objetivo de este trabajo es comparar dos protocolos, tripsinización e hinchamiento alcalino reversible, para descelularizar la hAM, evaluar la variabilidad saco-a-saco y determinar su efecto sobre las propiedades estructurales, ténsiles y de repoblación con células epiteliales vaginales humanas, estableciendo una relación entre procedimiento, composición residual de la ECM y comportamiento viscoelástico del material resultante [21].

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del tejido y protocolos de descelularización

Se obtuvieron doce sacos corioamnióticos de donantes primigestas menores de 30 años, sin comorbilidades, por cesárea y con consentimiento informado. Tras lavado con PBS estéril (pH 7.4, EDTA 1 %, antibióticos), se cortaron especímenes de 50 x 50 mm, se asignaron a tres grupos: nativo (control), SD y En.

Grupo SD (hinchamiento alcalino reversible + TX100). Las muestras se trataron en solución alcalina (20 ml de agua destilada con CaO al 0.2 % y TX100 al 0.25 % v/v, 1 h, TA, agitación) para inducir hinchamiento por repulsión de grupos carboxilato y promover la lisis celular. Después se incubaron con DNasa (0.04 mg/ml) y RNasa (0.02 mg/ml) en Tris·HCl 10 mM (ph 7.6; $MgCl_2$ 10 nM; $CaCl_2$ 10 mM) a 37 °C por 2 h. La reversión del hinchamiento se logró con sulfato de amonio al 0.5 % (20 min, TA).

Grupo En (EDTA-tripsina). Las muestras se preincubaron en PBS con EDTA al 1 % (30 min, TA), seguidas de tripsina porcina al 0.1 % (1000-2000 BAEE/mg) con EDTA al 0.25% (30 min, 37 °C). Después de tres lavados con PBS-antibióticos y solución de Hank, se aplicó el mismo tratamiento con nucleasas descrito para SD.

Ambos grupos recibieron un lavado final en PBS-EDTA (~12 h, 4-8 °C, agitación). Los protocolos se optimizaron a partir de estudios previos y de literatura especializada [17, 20, 21]. Se usaron tres réplicas por saco para los análisis bioquímicos y 6-9 tiras para análisis mecánico.

Caracterización bioquímica y estructural

El DNA residual se cuantificó por espectrofotometría con el kit Wizard® Genomic DNA (Promega) y se verificó por microscopía de excitación de dos fotones con DAPI. Los glicosaminoglicanos sulfatados (sGAG) se determinaron por el ensayo azul de 1,9-dimetil-metileno (540 nm) tras digestión con papaína. El colágeno IV, la fibronectina y el lumicán se cuantificaron por ELISA (FineTest®) en extractos tisulares (TER I, Invitrogen), previa homogeneización e inhibición de proteasas. La microestructura superficial se analizó por microscopía de generación de segundo armónico (SHG) y microscopía de excitación de dos fotones (TPEF).

Ensayos tensiles

Se ensayaron tiras liofilizadas de 35x5 mm con longitud efectiva de 25 mm, en una máquina electromecánica con celda de carga de 8 N (Futek LB200). El protocolo incluyó: (i) 5 ciclos de carga-descarga (0.8 mm, 0.05 mm/s); (ii) relajación de esfuerzos (estiramiento a 0.8 mm, 0.5 mm/s, registro 5 s); y (iii) ensayo hasta ruptura (0.5 mm/s). Las muestras se obtuvieron mediante cortes en tres direcciones: una dirección de referencia arbitraria (A.R.) y dos en ángulos agudos (<90°) a la izquierda y derecha de A.R. (+45° y −45°). Se compararon las tres direcciones de corte en saco nativo y uno tratado con el protocolo SD, y se evaluó la variabilidad saco-a-saco en cuatro sacos tratados con En. El módulo elástico se obtuvo en la región lineal rígida, y el esfuerzo (σ_ruptura) y la deformación (λ_ruptura) al punto de fallo.

Cultivo celular y análisis estadístico

Se cultivaron células epiteliales vaginales humanas VK2/E6E7 (ATCC CRL-2616) en medio libre de suero para queratinocitos (KSFM GIBCO-BRL 17005042) suplementado con $CaCl_2$ (44.1 mg/ml), extracto pituitario bovino (0.1 ng/ml) y factor de crecimiento epidérmico (0.05 mg/ml), denominado medio VK2 completo. Se realizaron dos pases una vez alcanzada una confluencia del 70-90 %, antes de los experimentos. Las células viables se contaron mediante el método de exclusión con azul de tripano en una cámara de Neubauer, obteniéndose una densidad de 2-3 × 10^6 células por caja de cultivo de 25 cm^2. Las muestras liofilizadas de hAM descelularizada se colocaron en placas de cultivo de 12 o 96 pozos y se preacondicionaron con medio para queratinocitos. Para las placas de 12 pozos, se colocó un cilindro de acero inoxidable sobre cada espécimen, con el fin de evitar la flotación del material. Las muestras se acondicionaron con 500 o 150 µl de medio durante 3 h antes de sembrar 1.25 × 10^5 o 2.5 × 10^4 células en los pozos con los materiales, en placas de 12 o 96 pozos, respectivamente. El cultivo se mantuvo durante 4 días en condiciones estándar (37 °C, 5 % de CO_2, 95 % de humedad relativa), con reemplazo del medio cada dos días. Se empleó un ensayo MTT para evaluar la actividad metabólica de las células cultivadas sobre los materiales en placas de 96 pozos. Adicionalmente, se realizó un ensayo de tinción de viabilidad celular vivo/muerto usando el Double Staining Kit (Cat. No. 04511, Sigma-Aldrich), que contiene calceína-AM y yoduro de propidio (PI) para teñir células viables y muertas, respectivamente (se incluyó un control de células muertas tratadas con etanol al 70 %).

RESULTADOS

Eficacia de la descelularización

Ambos protocolos redujeron aproximadamente 100 veces el contenido de ADN respecto al tejido nativo (1500-11 500 ng/mg). El ADN residual fue de 186 ± 71 ng/mg (En) y 220 ± 35 ng/mg (SD), equivalentes al 0.14-30 % y 1.7-10 % del contenido nativo, respectivamente. La microscopía SHG/DAPI (Fig. 1) confirmó la marcada reducción de núcleos en la superficie y sección transversal del tejido descelularizado respecto al nativo.

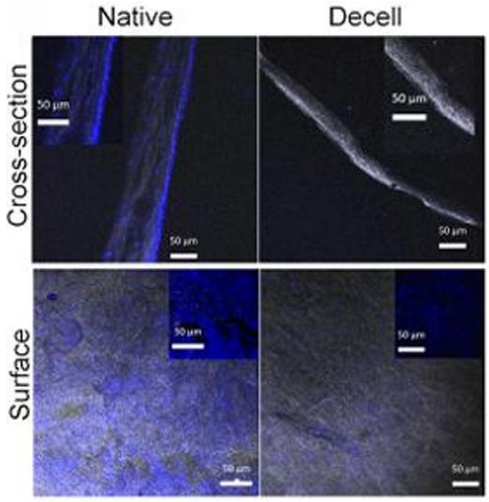


Fig 1. Microscopia de generación de segundo armónico (SHG) en el análisis de células del tejido nativo (marcadas con DAPI) en comparación con el tejido descelularizado, se aprecia una reducción significativa en el tejido tratado. (Objetivo 20x).

Efecto sobre la composición de la ECM

La proteína total disminuyó un 65 % (En) y 50 % (SD) respecto al tejido nativo ($p < 0.001$ en ambos casos). El contenido de colágeno IV extraído se mantuvo comparable en los tres grupos, sin diferencias significativas. La fibronectina se redujo un 98 % (En) y 94 % (SD), y el lumicán un 83 % (En) y 98 % (SD), ambos con diferencias altamente significativas respecto al nativo (Fig. 2). Los sGAG residuales fueron 4302 ± 769 ng/mg (En) y 2500 ± 619 ng/mg (SD), correspondientes al 1.5-30 % y 1-18 % del contenido nativo (11-55 µg/mg).

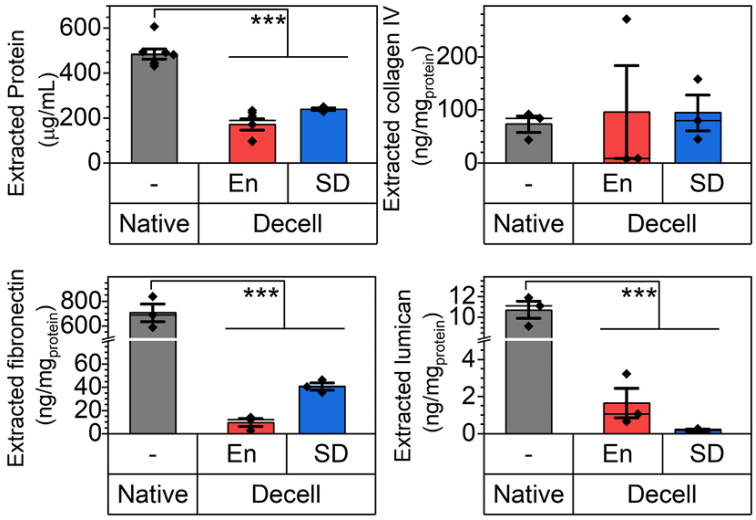


Fig. 2. Proteína total, colágeno IV, fibronectina y lumicán extraído del tejido nativo y su comparación con el tejido descelularizado por a) Protocolo En, b) Protocolo SD. Desviación estándar, n=3.

Respuesta esfuerzo-deformación

Las curvas esfuerzo-deformación (Fig. 3) presentaron dos porciones aproximadamente lineales, con un punto de transición a deformaciones del 0.4 % tanto en el tejido nativo como en las muestras descelularizadas. El esfuerzo de ruptura fue 29.5 ± 10.9 MPa (SD) frente a 8.2 ± 3.1 MPa (En), y la deformación a la ruptura 18 ± 7 % (SD) frente a 10 ± 4 % (En). El módulo elástico, tanto a bajo como a alto esfuerzo, fue significativamente menor en las muestras tratadas con En, mientras que las

descelularizadas con SD mantuvieron valores comparables al tejido nativo. No se observó dependencia de la dirección de corte en las propiedades elásticas y de ruptura en el estado liofilizado.

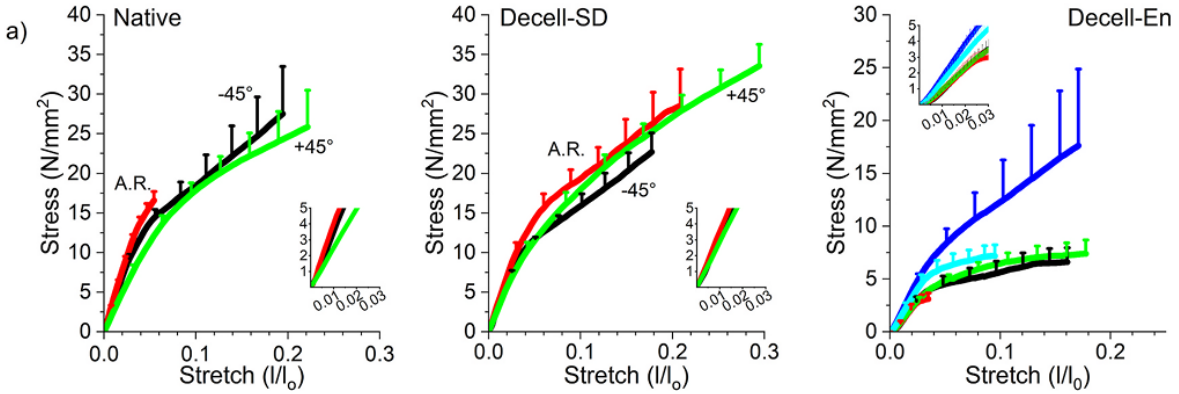


Fig. 3. Curvas promedio de esfuerzo-deformación para tejido nativo y tejido descelularizado empleando los Protocolos SD y En. Se muestra en cada caso un zoom en la región inicial con la que se realizó el cálculo del módulo elástico del material.

Adaptación de células epiteliales vaginales

La microscopía TPEF mostró una red de colágeno fibrilar y porosa en ambos andamios, con espacios intersticiales más amplios en el método SD (Fig. 4a). Las células VK2 colonizaron ambas superficies: en el lado coriónico adoptaron morfología poligonal con formación de cúmulos (Fig 4b), mientras que en el lado de la cavidad amniótica cubrieron uniformemente el material (Fig. 4c), de forma similar al control en plástico (Fig. 4d). La actividad metabólica fue significativamente superior en las células cultivadas sobre hAM descelularizada respecto al plástico: 94.1 ± 5.4 % (En) y 85.4 ± 1.9 % (SD) vs. 80.1 ± 2.5 % ($p < 0.05$, Fig. 4e). El ensayo vivo/muerto (Fig. 4f, g) evidenció integridad de membrana en la mayoría de las células en ambos tratamientos. El número de células VK2 viables fue significativamente mayor sobre el andamio En (48 ± 11/0.1 mm²) que sobre SD (24 ± 4/0.1 mm²; $p < 0.05$, Fig. 6h).

DISCUSIÓN

Ambos protocolos lograron la remoción celular eficaz (DNA residual ≤ 50 ng/mg, criterio estandarizado por Faulk y Badylak [22]), lo que resulta consistente con la ausencia de núcleos DAPI-positivos en la Fig. 1c y con lo reportado para andamios de ECM placentaria tratados con detergentes [23]. El reto principal es equilibrar la remoción del material celular con la preservación de la ECM [24], en un tejido con variabilidad intrínseca asociada al donante y a la porción anatómica [13,25,26]. La manipulación mínima exigida por las directrices regulatorias de la FDA [27] orienta la elección del método apropiado.

La composición residual de la ECM (Fig. 2) depende fuertemente del mecanismo de descelularización. El protocolo enzimático preservó el lumicán y sGAG, mientras que el protocolo detergente/alcalino eliminó casi por completo el lumicán pero retuvo mejor la fibrotecnina. Esta diferencia se explica por la acción selectiva de cada método: la tripsina/EDTA hidroliza enlaces peptídicos removiendo fibronectina y exponiendo sGAG libre, en tanto que el hinchamiento alcalino puede disociar proteoglicanos unidos al colágeno o inducir β-eliminación de las cadenas de sGAG [20]. El colágeno IV extraíble se mantuvo constante, sugiriendo conservación de la membrana basal, un componente bioactivo relevante en la vasculatura y la adhesión celular [28]. En consecuencia, la matriz residual difiere en sesgo bioquímico: el método En genera un material más rico en PGs y sGAG, mientras que SD produce uno más rico en fibronectina.

Las propiedades mecánicas (Fig. 3) confirman que la hidrólisis de la triple hélice del colágeno inducida por tripsina compromete tanto la rigidez como la resistencia a la ruptura, presentando la

relación En < nativo = SD, consistente con la fuerte dependencia entre microestructura del colágeno y respuesta mecánica de la hAM reportada previamente [2]. Los valores aquí obtenidos (29.5 ± 10.9 MPa para SD; 8.2 ± 3.1 MPa para En) son superiores a los reportados en la literatura bajo condiciones hidratadas, que oscilan entre 2.29-7.37 MPa para membranas nativas y ~3.55 MPa para descelularizadas [29-33]; esta diferencia es atribuible al estado liofilizado de las muestras, el cual favorece la esterilización y manipulación para manufactura. El hinchamiento alcalino reversible preserva la ultraestructura y la resistencia del tejido nativo, mientras que la tripsinización las degrada irreversiblemente.

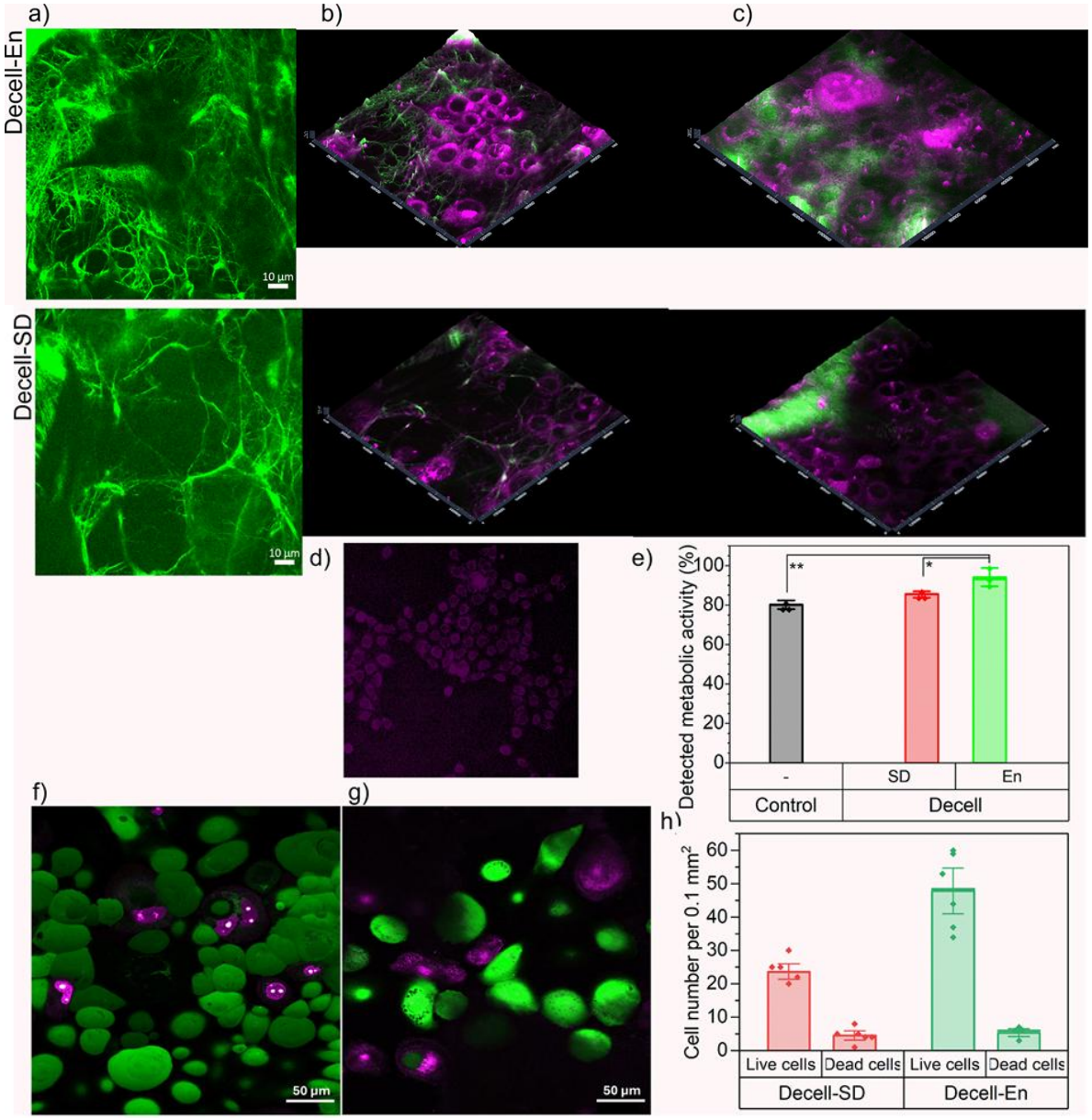


Fig. 4. a) Microscopía de excitación de dos fotones (TPEF) para el colágeno del tejido hAM descelularizado (en verde) y de las células VK2/E6E7 (en magenta) cultivadas en ellas por 4 días. Se inspeccionaron en las secciones b) coriónica y c) amniótica, en las que se cultivaron las células, d) comparación con células cultivadas en pocillos de plástico. e) Actividad metabólica de las células cultivadas en pocillos de plástico (control) y en tejido hAM tratado. Imágenes representativas de la prueba live/dead para las células VK2 (vivas en verde, muertas en magenta) cultivadas por 4 días en hAM descelularizada por los protocolos f) En y g) SD, h) con su respectivo conteo celular.

La adaptación de las células epiteliales vaginales VK2 (Fig. 4) depende tanto del método de descelularización como del lado del andamio en el que son cultivadas. La reepitelización fue más uniforme en el lado de la cavidad amniótica y condujo a la formación de cúmulos celulares en el lado coriónico. El mayor número y actividad metabólica de VK2 sobre el andamio En concuerda con la mayor retención de lumicán [34] y sGAG [35,36], componentes que favorecen la adhesión, la migración, la proliferación y la regulación del microambiente celular. Aunque la fibronectina con secuencia RGD se extrae más fácilmente del material SD y participa en el ensamblaje de la MEC y en la señalización por integrinas [37-39], la adaptación celular resulta más favorable en el andamio En bajo las condiciones aquí evaluadas. Estas observaciones apoyan la viabilidad de la hAM descelularizada como plataforma para estrategias de reepitelización e ingeniería de tejido vaginal [40,41].

CONCLUSIONES

El tratamiento con surfactantes no iónicos e hinchamiento alcalino reversible (SD) constituye un método eficaz para reducir el material celular preservando la ultraestructura, la anisotropía mecánica y la resistencia tensil del tejido nativo, por lo que se recomienda sobre el tratamiento con EDTA/tripsina (En) cuando el objetivo es conservar la integridad mecánica. Inversamente, el método En es preferible cuando se requiere una matriz más rica en PGs y sGAG que favorezca la adaptación celular, como evidenciaron la actividad metabólica y la proliferación superiores de las células VK2 sobre estos andamios. La superficie de ambos materiales exhibe una red de colágeno fibrilar y poroso, más abierta en el método SD, y la adaptación de las células epiteliales vaginales depende de la porción anatómica del tejido nativo utilizada como sustrato.

FINANCIAMIENTO Y DECLARACIONES

Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos CF-2023-I-2285 y CF-2019-2000065 (SECIHTI) y 053/2021 (IDEAGTO). Los autores declaran la existencia de una patente en trámite (MX/A/2024/009922) relacionada con productos biomédicos derivados de membrana amniótica humana. Los datos estarán disponibles a solicitud.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gholipourmalekabadi, M., Mozafari, M., Salehi, M., Seifalian, A., Bandehpour, M., Ghanbarian, H., Urbanska, A.M., Sameni, M., Samadikuchaksaraei, A., Seifalian, A.M., 2015. Development of a cost-effective and simple protocol for decellularization and preservation of human amniotic membrane as a soft tissue replacement and delivery system for bone marrow stromal cells. Adv. Healthcare Mater. 4, 918-926. https://doi.org/10.1002/adhm.201400704.
2. Jabareen, M., Mallik, A.S., Bilic, G., Zisch, A.H., Mazza, E., 2009. Relation between mechanical properties and microstructure of human fetal membranes: an attempt towards a quantitative analysis. Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol. 144 (Suppl. 1). https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2009.02.032.
3. Shilo, D., Shalev, E., 2023. New insights on the biomechanics of the fetal membrane. Front. Biosci. Scholar. https://doi.org/10.31083/j.fbs1502006.
4. Mamede, A.C., Carvalho, M.J., Abrantes, A.M., Laranjo, M., Maia, C.J., Botelho, M.F., 2012. Amniotic membrane: from structure and functions to clinical applications. Cell Tissue Res. https://doi.org/10.1007/s00441-012-1424-6.
5. Riau, A.K., Beuerman, R.W., Lim, L.S., Mehta, J.S., 2010. Preservation, sterilization and de-epithelialization of human amniotic membrane for use in ocular surface reconstruction. Biomaterials. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.034.
6. Arrizabalaga, J.H., Nollert, M.U., 2018. Human amniotic membrane: a versatile scaffold for tissue engineering. ACS Biomater. Sci. Eng. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00015.
7. Hu, Z., Luo, Y., Ni, R., Hu, Y., Yang, F., Du, T., Zhu, Y., 2023. Biological importance of human amniotic membrane in tissue engineering and regenerative medicine. Mater. Today Bio. https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100790.

8. van Hengel, E.V.A., van der Laan, L.J.W., de Jonge, J., Verstegen, M.M.A., 2025. Towards safety and regulation criteria for clinical applications of decellularized organ-derived matrices. Bioengineering. https://doi.org/10.3390/bioengineering12020136.
9. Guo, X., Zhang, W., Lu, J., Zhu, Y., Sun, H., Xu, D., Xian, S., Yao, Y., Qian, W., Lu, B., Shi, J., Ding, X., Li, Y., Tong, X., Xiao, S., Huang, R., Ji, S., 2024. Amniotic miracle: investigating the unique development and applications of amniotic membrane in wound healing. Skin Res. Technol. 30. https://doi.org/10.1111/srt.13860.
10. Munoz-Torres, J.R., Martínez-González, S.B., Lozano-Luján, A.D., Martínez-Vázquez, M.C., Velasco-Elizondo, P., Garza-Veloz, I., Martinez-Fierro, M.L., 2023. Biological properties and surgical applications of the human amniotic membrane. Front. Bioeng. Biotechnol. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1067480.
11. Niknejad, H., Peirovi, H., Jorjani, M., Ahmadiani, A., Ghanavi, J., Seifalian, A.M., 2008. Properties of the amniotic membrane for potential use in tissue engineering. Eur. Cell. Mater. 15, 88-99. https://doi.org/10.22203/ecm.v015a07.
12. Oxlund, H., Helmig, R., Halaburt, J.T., Uldbjerg, N., 1990. Biomechanical analysis of human chorioamniotic membranes. Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol. 34, 247-255.
13. Grémare, A., Jean-Gilles, S., Musqui, P., Magnan, L., Torres, Y., Fénelon, M., Brun, S., Fricain, J.-C., L'heureux, N., 2019. Cartography of the mechanical properties of the human amniotic membrane. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 99, 18-26.
14. Chen, B., Jones, R.R., Mi, S., Foster, J., Alcock, S.G., Hamley, I.W., Connon, C.J., 2012. The mechanical properties of amniotic membrane influence its effect as a biomaterial for ocular surface repair. Soft Matter 8, 8379-8387. https://doi.org/10.1039/c2sm26175h.
15. Koh, C.T., Tonsomboon, K., Oyen, M.L., 2019. Fracture toughness of human amniotic membranes. Interf. Focus 9. https://doi.org/10.1098/rsfs.2019.0012.
16. Salah, R.A., Mohamed, I.K., El-Badri, N., 2018. Development of decellularized amniotic membrane as a bioscaffold for bone marrow-derived mesenchymal stem cells: ultrastructural study. J. Mol. Histol. 49, 289-301. https://doi.org/10.1007/s10735-018-9768-1.
17. Khosravimelal, S., Momeni, M., Gholipur, M., Kundu, S.C., Gholipourmalekabadi, M., 2020. Protocols for decellularization of human amniotic membrane, en: Methods in Cell Biology. Academic Press Inc., pp. 37-47. https://doi.org/10.1016/bs.mcb.2019.11.004.
18. Milan, P.B., Amini, N., Joghataei, M.T., Ebrahimi, L., Amoupour, M., Sarveazad, A., Kargozar, S., Mozafari, M., 2020. Decellularized human amniotic membrane: from animal models to clinical trials. Methods 171, 11-19. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2019.07.018.
19. Cui, W., Khan, K.M., Ma, X., Chen, G., Desai, C.S., 2020. Human amniotic epithelial cells and human amniotic membrane as a vehicle for islet cell transplantation. Transplant. Proc. 52, 982-986. https://doi.org/10.1016/j.transproceed.2020.01.022.
20. Mendoza-Novelo, B., Avila, E.E., Cauich-Rodríguez, J.V., Jorge-Herrero, E., Rojo, F.J., Guinea, G.V., Mata-Mata, J.L., 2011. Decellularization of pericardial tissue and its impact on tensile viscoelasticity and glycosaminoglycan content. Acta Biomater. 7, 1241-1248. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.11.017.
21. Alcántara-Moreno, R. A., Luévano-Colmenero, G. H., Hernandez, P. A. I., García-Tejada, E. P., Díaz-Sandoval, S., Alva-Murillo, P. N., ... & Mendoza-Novelo, B. (2026). Decellularization of human amniotic membrane and its impact on mesh bioscaffold properties. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 107417.
22. Faulk, D.M., Badylak, S.F., 2014. Natural biomaterials for regenerative medicine applications, en: Regenerative Medicine Applications in Organ Transplantation. Elsevier Inc., pp. 101-112. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398523-1.00008-2.
23. Capella-Monsonís, H., Cramer, M., Turner, N., Reing, J., Zhang, L., Kronengold, R.T., Bartolacci, J., Badylak, S.F., 2023. The composition and mechanical properties of porcine placental ECM from three different breeds. Biomed. Phys. Eng. Express 9. https://doi.org/10.1088/2057-1976/acfb05.
24. Leal-Marin, S., Kern, T., Hofmann, N., Pogozhykh, O., Framme, C., Börgel, M., Figueiredo, C., Glasmacher, B., Gryshkov, O., 2021. Human Amniotic membrane: a review on tissue engineering, application, and storage. J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater. https://doi.org/10.1002/jbm.b.34782.

25. Kawecki, F., Gluais, M., Claverol, S., Dusserre, N., McAllister, T., L'Heureux, N., 2022. Inter-donor variability of extracellular matrix production in long-term cultures of human fibroblasts. Biomater. Sci. 10, 3935-3950. https://doi.org/10.1039/d1bm01933c.
26. Nieuwenhuis, T.O., Rosenberg, A.Z., McCall, M.N., Halushka, M.K., 2021. Tissue, age, sex, and disease patterns of matrisome expression in GTEx transcriptome data. Sci. Rep. 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00943-x.
27. Part 1271 Human Cells, Tissues, and Cellular and Tissue-Based Products. Title 21—Food and Drugs, Chapter I—Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services, Subchapter L—Regulations Under Certain Other Acts Administered by the Food and Drug Administration.
28. Arenas-Herrera, J.E., Ko, I.K., Atala, A., Yoo, J.J., 2013. Decellularization for whole organ bioengineering. Biomed. Mater. 8, 14106. https://doi.org/10.1088/1748-6041/8/1/014106.
29. Ashouri, S., Hosseini, S.A., Hoseini, S.J., Tara, F., Ebrahimzadeh-Bideskan, A., Webster, T.J., Kargozar, S., 2022. Decellularization of human amniotic membrane using detergent-free methods: possibilities in tissue engineering. Tissue Cell 76. https://doi.org/10.1016/j.tice.2022.101818.
30. Kafili, G., Tamjid, E., Simchi, A., 2024. The impact of mechanical tuning on the printability of decellularized amniotic membrane bioinks for cell-laden bioprinting of soft tissue constructs. Sci. Rep. 14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80973-3.
31. Kayal, C., Shipley, R.J., Phillips, J.B., 2019. Physical and mechanical properties of RAFT-stabilised collagen gels for tissue engineering applications. J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 99, 216-224. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.07.011.
32. Oyen, M.L., Calvin, S.E., Cook, R.F., 2004. Uniaxial stress-relaxation and stress-strain responses of human amnion. J. Mater. Sci. Mater. Med. 15, 619-624.
33. Wilshaw, S.-P., Kearney, J.N., Fisher, J., Ingham, E., 2006. Production of an acellular amniotic membrane matrix for use in tissue engineering. Tissue Eng. 12, 1-13.
34. Liu, X.-J., Kong, F.-Z., Wang, Y.-H., Zheng, J.-H., Wan, W.-D., Deng, C.-L., Mao, G.-Y., Yang, X.-M., Zhang, Y.-L., Zhang, X.-L., Yang, S.-L., Zhang, Z.-G., 2013. Lumican accelerates wound healing by enhancing α2β1 integrin-mediated fibroblast contractility. PLoS One 8 (6), e67124. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067124.
35. Sodhi, H., Panitch, A., 2021. Glycosaminoglycans in tissue engineering: a review. Biomolecules. https://doi.org/10.3390/biom11010029.
36. Uhl, F.E., Zhang, F., Pouliot, R.A., Uriarte, J.J., Rolandsson Enes, S., Han, X., Ouyang, Y., Xia, K., Westergren-Thorsson, G., Malmström, A., Hallgren, O., Linhardt, R.J., Weiss, D.J., 2020. Functional role of glycosaminoglycans in decellularized lung extracellular matrix. Acta Biomater. 102, 231-246. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.11.029.
37. Golebiowska, A.A., Intravaia, J.T., Sathe, V.M., Kumbar, S.G., Nukavarapu, S.P., 2024. Decellularized extracellular matrix biomaterials for regenerative therapies: advances, challenges and clinical prospects. Bioact. Mater. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2023.09.017.
38. Hielscher, A., Ellis, K., Qiu, C., Porterfield, J., Gerecht, S., 2016. Fibronectin deposition participates in extracellular matrix assembly and vascular morphogenesis. PLoS One 11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147600.
39. Prasad, A., Clark, R.A., 2018. Fibronectin interaction with growth factors in the context of general ways extracellular matrix molecules regulate growth factor signaling. G. Ital. Dermatol. Venereol. https://doi.org/10.23736/S0392-0488.18.05952-7.
40. Li, Y., An, S., Deng, C., Xiao, S., 2023. Human acellular amniotic membrane as skin substitute and biological scaffold: a review of its preparation, preclinical research, and clinical application. Pharmaceutics. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092249.
41. Tauseef, H., Ahmed, K., Chaudhary, F., Salim, A., Mohiuddin, O.A., 2025. The impact of decellularization method on the cytocompatibility and wound healing capability of human amniotic membrane. Adv. Biol. 9. https://doi.org/10.1002/adbi.202400509.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEJORADO DE AEROGELES DE TiO_2-SiO_2 MEDIANTE ESPECTROSCOPIA RAMAN POLARIZADA

Leonardo Frias Gasparri, Claudio Frausto Reyes, Carlos Antonio Pineda Arellano, Melissa de Jesús Rodríguez Flores, Juan Manuel López Téllez, Rodolfo Martínez Manuel

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
leonardo.friasgasparri@cio.mx

RESUMEN

Los aerogeles son materiales porosos con alta área superficial, baja densidad y propiedades térmicas y ópticas únicas, lo que los hace atractivos para aplicaciones como catálisis, sensores y almacenamiento de energía. La espectroscopia Raman se utiliza ampliamente para la caracterización estructural de materiales y es especialmente eficaz en la identificación de fases cristalinas. En aerogeles híbridos de TiO_2-SiO_2, permite la detección de la fase anatasa y de bandas asociadas a defectos en la matriz de sílice. Sin embargo, la naturaleza amorfa del dióxido de silicio generalmente produce señales Raman débiles con un alto nivel de ruido, lo que complica la interpretación espectral. Este trabajo propone el uso de la polarización de la señal esparcida para obtener por separado los componentes isotrópico y anisotrópico del espectro Raman, con el objetivo de mejorar la calidad espectral. Para ello, se sintetizó un aerogel mediante el método sol-gel, asistido por un tratamiento solvotermal y secado a presión ambiente, seguido de un proceso de calcinación. La muestra fue analizada mediante espectroscopia Raman variando la orientación del polarizador de la señal esparcida en configuraciones paralela y perpendicular respecto al polarizador del láser. Se realizaron caracterizaciones adicionales mediante difracción de rayos X (DRX) para confirmar la presencia de las fases cristalinas. El procesamiento de la señal Raman polarizada, considerando los componentes isotrópico y anisotrópico, dio como resultado un espectro con mejor visibilidad de la señal y mayor resolución de las bandas características, facilitando así la identificación e interpretación de las fases presentes. Se concluye que el uso de la polarización en la espectroscopia Raman es un enfoque prometedor para mejorar la resolución espectral y la calidad de la señal en sistemas con respuesta Raman débil, como los aerogeles de TiO_2-SiO_2.

INTRODUCCIÓN

Los aerogeles de dióxido de titanio y dióxido de silicio (TiO_2-SiO_2) han despertado gran interés en los últimos años debido a sus propiedades estructurales y funcionales, entre las que destacan su alta porosidad, baja densidad, elevada área superficial y estabilidad térmica (Zhi et al., 2022). Estas características los convierten en materiales prometedores para aplicaciones en fotocatálisis, sensores, adsorción y almacenamiento de energía. En particular, la incorporación de TiO_2 en matrices de SiO_2 permite combinar la actividad fotocatalítica del dióxido de titanio con la estabilidad estructural y transparencia óptica del dióxido de silicio, dando lugar a materiales híbridos con propiedades ajustables (Jung et al., 2024).

La caracterización estructural de estos aerogeles representa un reto debido a la coexistencia de regiones cristalinas y amorfas dentro del material. La espectroscopía Raman es una técnica ampliamente utilizada para identificar fases cristalinas, defectos y modos vibracionales característicos; sin embargo, en sistemas basados en dióxido de silicio la intensidad de la señal Raman suele ser débil y puede verse afectada por ruido y fluorescencia de fondo, dificultando la interpretación de los espectros obtenidos (Riegel et al., 1997).

Una alternativa para mejorar el análisis espectral consiste en emplear espectroscopía Raman polarizada. Mediante el control de la polarización de la radiación esparcida es posible separar las contribuciones isotrópicas y anisotrópicas del espectro Raman, permitiendo resaltar modos vibracionales específicos y reducir interferencias asociadas al desorden estructural y al fondo espectral. En particular, el Raman isotrópico proporciona una representación más simplificada del

espectro convencional, facilitando la identificación de bandas asociadas a vibraciones simétricas y al entorno estructural promedio del material (Petrov & Matrosov, 2023).

En este trabajo se sintetizaron aerogeles de TiO_2-SiO_2 mediante el método sol-gel con secado a presión ambiente que fueron sometidos a un tratamiento térmico. Posteriormente, las muestras fueron caracterizadas mediante espectroscopía Raman convencional, Raman isotrópico y difracción de rayos X, con el objetivo de evaluar el aporte de la polarización Raman en la mejora de la resolución espectral y en la identificación estructural de este tipo de materiales híbridos.

TEORÍA

Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es una técnica usada para el análisis de una gran variedad de materiales. Puede ser usada para determinar propiedades tanto de materiales orgánicos como inorgánicos y también provee información de las fases, funciones y defectos de los materiales. Con el tiempo la técnica se ha seguido desarrollando y hoy en día es una de las más versátiles, con ella se pueden llegar a hacer análisis de campo y su uso en áreas biológicas y analíticas ha ido en aumento (Orlando et al., 2021). De manera resumida, la espectroscopía Raman utiliza una fuente de radiación con una única frecuencia para irradiar la muestra y detecta la radiación esparcida por la molécula, con una unidad vibracional de energía diferente del haz incidente como se muestra en la Figura 1 (Castro et al., 2013).

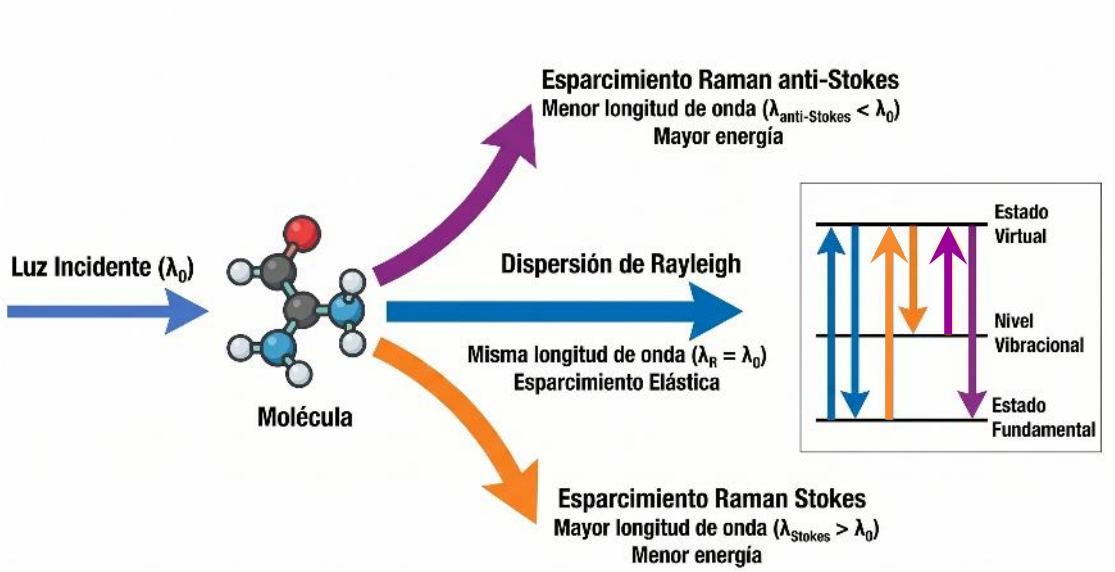


Figura 1. Fenómeno de dispersión Rayleigh y esparcimiento Raman.

Polarización

La luz es una onda electromagnética transversal compuesta por campos eléctrico y magnético que oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Su estado de polarización describe la orientación de las oscilaciones del campo eléctrico dentro del plano transversal y puede ser modificado mediante elementos ópticos como polarizadores, lentes, espejos, recubrimientos, redes de difracción o cristales (Chipman et al., 2018). En la luz linealmente polarizada la orientación del campo eléctrico permanece constante, aunque su magnitud y signo varíen con el tiempo.
En este tipo de polarización, el campo eléctrico se encuentra contenido en el denominado plano de vibración, el cual está definido por el vector de campo eléctrico (E) y el vector de propagación (k) que indica la dirección de avance de la onda (Hecht, 2017).

Los láseres usados en la espectroscopía Raman suelen estar por lo menos parcialmente polarizados, sin embargo, muchos espectrómetros cuentan con un polarizador que asegura la polarización linear de la luz e incluso puede alterar la dirección de dicha polarización de ser necesario (Smith & Dent, 2019).

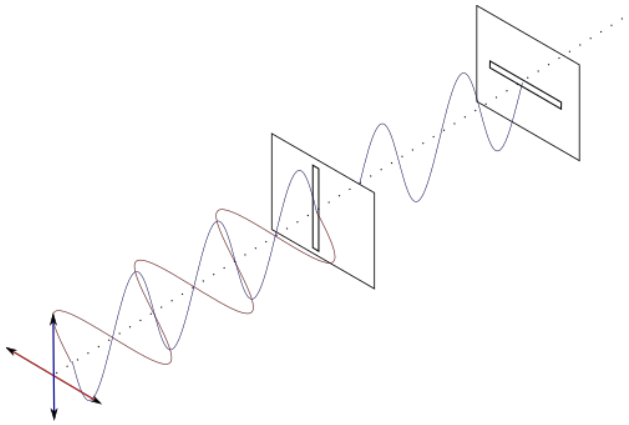


Figura 2. Haz de luz atravesando un polarizador vertical y horizontal.

Raman isotrópico

De acuerdo a Petrov & Matrosov (2023), una de las virtudes de la espectroscopía Raman, como se mencionó anteriormente es que puede ser modificada para realizar mediciones polarizando la luz de diferentes maneras, esto permite que podamos comprender la orientación de las moléculas, suprimir interferencias de fondo y fluorescencia, determinar la simetría de las vibraciones, entre otras aplicaciones. Una manera de usar la polarización con esta técnica es obtener la componente isotrópica ($\mathbf{I_i}$) y anisotrópica ($\mathbf{I_a}$) del espectro raman por separado, esto se logra registrando los espectros que se obtienen colocando el polarizador de la radiación esparcida de manera paralela al polarizador del láser ($\mathbf{I_\parallel}$) y colocándolo de manera perpendicular al del láser ($\mathbf{I_\perp}$), respectivamente, y realizando los siguientes cálculos:

$$\mathbf{I_a} = \mathbf{I_\perp} \tag{1}$$

$$\mathbf{I_i} = \mathbf{I_\parallel} - \frac{\mathbf{4}}{\mathbf{3}}\mathbf{I_\perp} \tag{2}$$

La componente más interesante es el esparcimiento Raman isotrópico, ya que es la que contribuye con la mayor parte de la intensidad y su espectro es una versión más simplificada del espectro Raman convencional con menor interferencia debido a que las bandas de deformación están despolarizadas.

Aerogeles de dióxido de titanio y dióxido de silicio

Como una estructura porosa tridimensional (3D), un aerogel posee características como alta área superficial específica, tamaño de poro ajustable y gran volumen de poro, lo que lo distingue de sus contrapartes convencionales en polvo o película. Estas ventajas permiten a los aerogeles exponer más sitios catalíticos activos y soportar otros cocatalizadores activos (Zhi et al., 2022).

Los aerogeles de TiO_2 se presentan como uno de los fotocatalizadores más prometedores por sus destacadas propiedades físicas y químicas, como su alto potencial redox, fuerte resistencia a la corrosión química y foto-corrosión, bajo costo, no toxicidad, estabilidad, fácil preparación con diversas morfologías y un consumo de energía significativamente bajo (Tinoco Navarro & Jaroslav, 2023).

Por otro lado, los aerogeles de dióxido de silicio (SiO_2) son materiales que suelen tener estructuras rígidas, una gran cantidad de poros que llegan a medir entre 10 y 50 nm, baja densidad, índice de refracción, conductividad térmica y alta transparencia óptica, lo que los hace de gran interés para aplicaciones como catálisis, detección y fotoquímica, debido a que pueden proporcionar un soporte permeable a gases para muchos tipos de nanomateriales (Amonkosolpan et al., 2012). Sin embargo, este tipo de aerogeles suelen presentar señales Raman muy débiles y una gran cantidad de fluorescencia debido a la presencia de grupos funcionales en su superficie, aunque esto depende del método de síntesis (Riegel et al., 1997).



Figura 3. Aerogel de dióxido de silicio sintetizado en el Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

En estos aerogeles compuestos el aerogel de dióxido de silicio suele actuar como soporte y formador de estructura microporosa, mientras que el dióxido de titanio juega el rol de material funcionalizado. Los estudios suelen centrarse en la formación de compuestos silice-titania o aerogeles híbridos para aplicaciones en catálisis, esto debido a que no se ha encontrado la existencia de un compuesto estable entre la sílice y la titania que pueda generar una red homogénea de aerogeles compuestos (Jung et al., 2024). Aerogeles mesoporosos de dióxido de titanio-dióxido de silicio con manganeso y cobalto han demostrado una mejora contra dióxido de titanio comercial en la adsorción de colorantes, además, se sugiere que los metales de transición dopantes habilitan la fotoactividad en luz visible y mejoran la adsorción de contaminantes en este tipo de aerogeles (Rankin et al., 2014).

PARTE EXPERIMENTAL

Se sintetizaron aerogeles de dióxido de titanio-dióxido de silicio mediante el método sol-gel con secado a presión ambiente siguiendo la metodología representada en la Figura 4.
Primero se prepararon dos soluciones, para la solución de los precursores se mezcló 6.4 mL de isopropóxido de titanio ($(C_4H_9O)_4Ti$), 6.4 mL de tetraetil ortosilicato ($(C_2H_5O)_4Si$) y 12 mL de etanol absoluto (C_2H_5OH) en agitación durante 45 minutos. Para la otra solución, la mezcla catalítica, se mezclaron 2 mL de ácido acético glacial (CH_3COOH), 1 mL de agua ultrapura (HPLC) y 12 mL de etanol, también bajo agitación durante 45 minutos.

Posteriormente se agregó la mezcla catalítica a la solución de los precursores gota a gota, en agitación constante. A la solución resultante se le añadió una solución de amoniaco gota a gota hasta ajustar el pH a 6. Posteriormente se dejó envejecer el gel durante 24 horas y se sometió a un tratamiento solvotermal por 12 horas a una temperatura de 180 °C.

El material resultante fue lavado con etanol a 60 °C durante 72 horas, reemplazando la solución de etanol cada 24 horas. Finalmente, el material se secó a 60 °C por 48 horas. Los aerogeles resultantes fueron tratados térmicamente a diferentes temperaturas para tener 5 muestras diferentes, sin tratamiento (WT), con tratamiento a 550, 650, 750 y 850 °C.

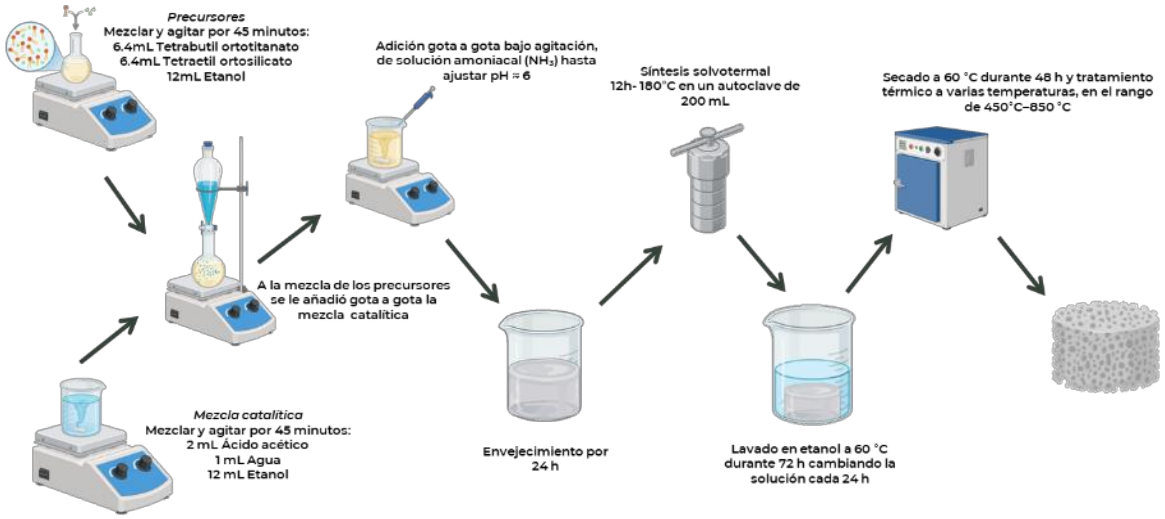


Figura 4. Diagrama de la metodología usada para la síntesis de aerogeles de dióxido de titanio-dióxido de silicio.

Posteriormente dichos aerogeles fueron caracterizados mediante espectroscopia Raman tradicional, espectroscopia Raman isotrópica y difracción de rayos X (DRX). Para estos análisis se usaron dos arreglos ópticos distintos de un sistema Raman con geometría de 180 grados, los cuales están ilustrados esquemáticamente en la Figura 6. La primera configuración se emplea para el análisis mediante espectroscopia Raman convencional y la segunda para realizar espectroscopia Raman isotrópica, incorporando un segundo polarizador en el arreglo que permite obtener el vector de polarización paralelo y perpendicular de la señal.

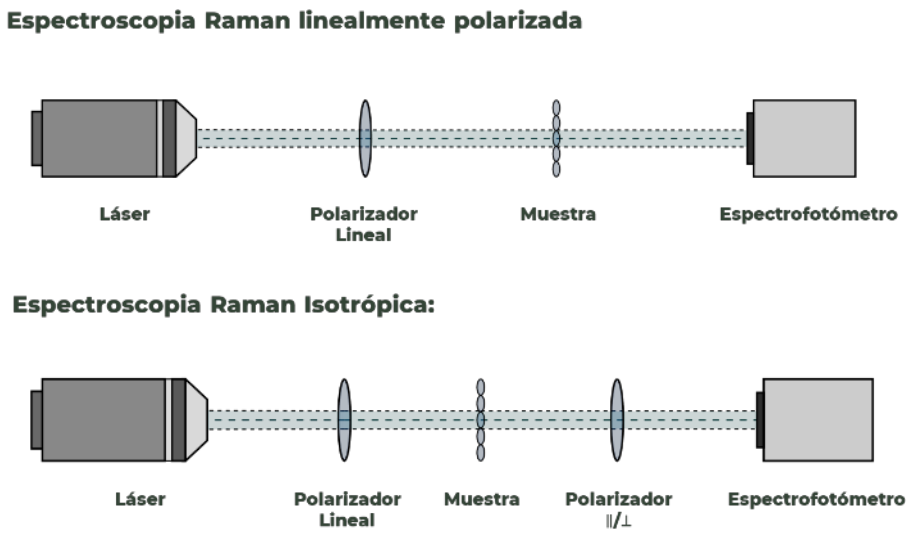


Figura 5. Esquemas representativos de los arreglos ópticos usados para caracterizar los aerogeles.

RESULTADOS

En la Figura 6 se pueden ver los espectros Raman obtenidos usando polarización lineal para los aerogeles calcinados a diferentes temperaturas (550 °C - 850 °C) y sin calcinar (WT). Para los materiales sin calcinar y calcinados a 550 y 650 °C no se aprecian modos vibracionales definidos, por otro lado, en los espectros de los aerogeles calcinados a 750 y 850 °C se pudieron determinar los modos fundamentales activos Raman de la anatasa a 142 (E_{1g}), 197 (E_{2g}), 397 (B_{1g}), 518 (A_{1g} + B_{1g}) y 640 cm^{-1} (E_g), indicando que la anatasa es la fase predominante en la estructura (Moussaoui et al., 2017).

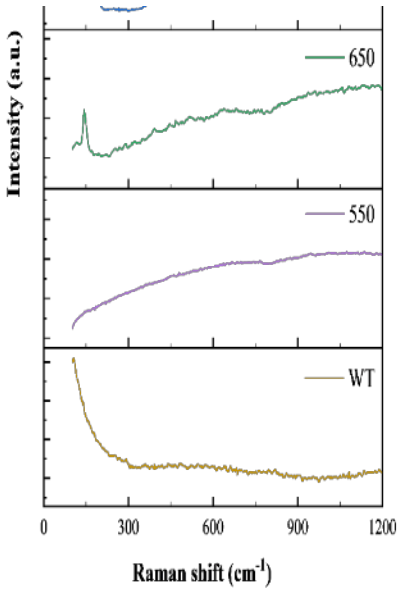


Figura 6. Espectros Raman linealmente polarizados de los

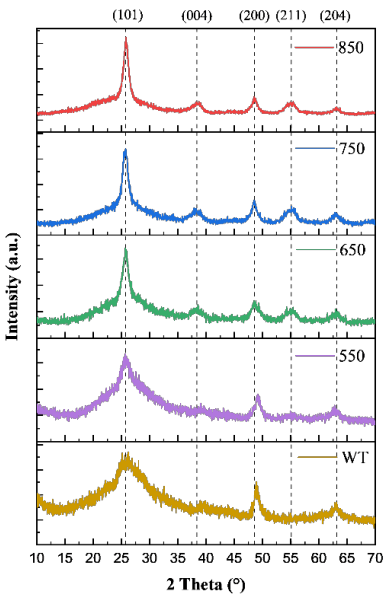


Figura 7. Difractogramas de los aerogeles obtenidos.

En la Figura 7 se puede apreciar el espectro XRD de los cinco aerogeles obtenidos, en el cual se pueden apreciar las bandas correspondientes a los planos cristalinos característicos de la fase anatasa (101, 004, 200, 211 y 204) marcadas con líneas punteadas. En este caso se ve que a partir de los 650 °C se comienza a formar esta fase, pero es después de los 750 °C que se convierte en la fase predominante del aerogel. Estos datos coinciden con los obtenidos anteriormente mediante la espectroscopia Raman (Zhao et al., 2017).

Las Figuras 8 y 9 muestran los espectros Raman convencionales obtenidos para los aerogeles TiO_2-SiO_2 calcinados a 750 y 850 °C, respectivamente. En ambos casos se observan bandas correspondientes a los modos vibracionales característicos de la fase anatasa del dióxido de titanio a 142 (E_{1g}), 197 (E_{2g}), 397 (B_{1g}), 518 (A_{1g} + B_{1g}) y 640 cm^{-1} (E_g). La muestra tratada a 850 °C presenta bandas más definidas y un menor nivel de ruido, lo que sugiere un incremento en la cristalinidad del material debido al tratamiento térmico (Moussaoui et al., 2017).

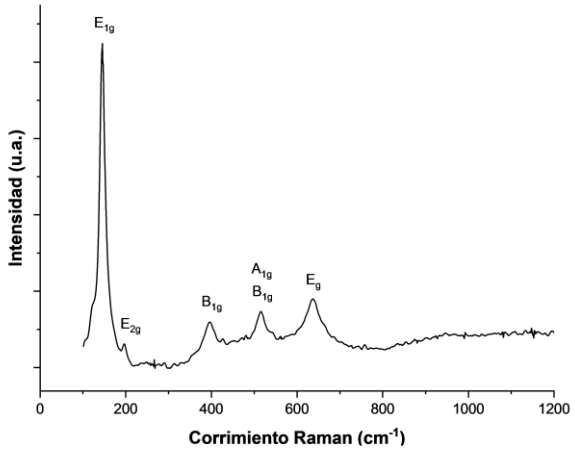


Figura 8. Espectro Raman convencional obtenido del aerogel de dióxido de titanio-dióxido de silicio calcinado a 750 °C.

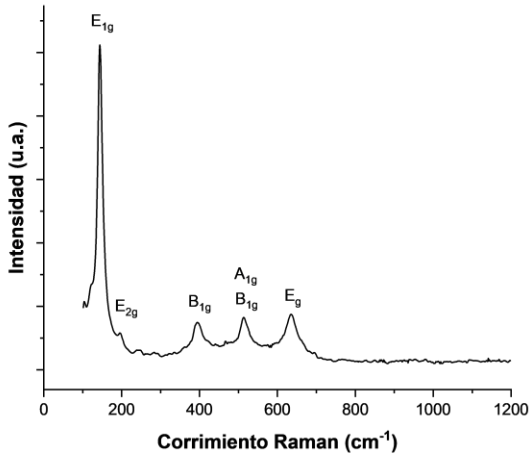


Figura 9. Espectro Raman convencional obtenido del aerogel de dióxido de titanio-dióxido de silicio calcinado a 850 °C.

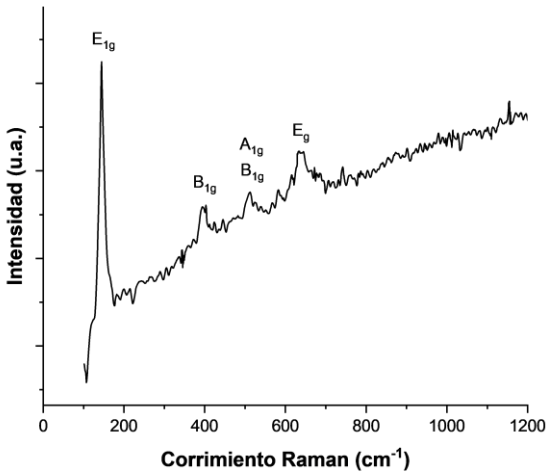


Figura 10. Espectro Raman isotrópico obtenido del aerogel de dióxido de titanio-dióxido de silicio calcinado a 750 °C.

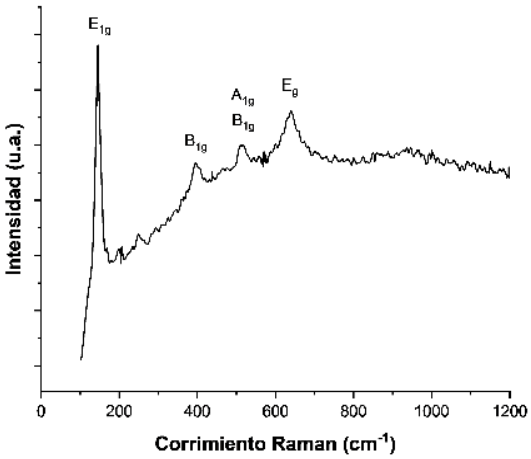


Figura 11. Espectro Raman isotrópico obtenido del aerogel de dióxido de titanio-dióxido de silicio calcinado a 850 °C.

Por otro lado, las Figuras 10 y 11 corresponden a los espectros Raman isotrópicos obtenidos para las mismas muestras. En comparación con los espectros Raman convencionales, los espectros isotrópicos presentan una reducción en la intensidad relativa de algunos modos vibracionales asociados a componentes anisotrópicas, particularmente el modo 142 cm^{-1} (E_{1g}) asociado a la fase anatasa. Esto indica que dicho modo presenta un carácter predominantemente anisotrópico.

Asimismo, el Raman isotrópico permitió resaltar contribuciones asociadas al entorno estructural promedio del material y evidenciar de manera más clara el fondo espectral relacionado con regiones amorfas o parcialmente desordenadas de la matriz de SiO_2. La simplificación del espectro obtenida mediante el procesamiento isotrópico facilita la interpretación de las bandas Raman y permite distinguir con mayor claridad las contribuciones vibracionales simétricas del sistema TiO_2-SiO_2.

Los resultados obtenidos demuestran que la espectroscopía Raman isotrópica proporciona información complementaria al Raman convencional, permitiendo un análisis más detallado de la organización estructural y de la evolución de la cristalinidad en función de la temperatura de calcinación.

CONCLUSIONES

Se sintetizaron exitosamente aerogeles híbridos de TiO_2-SiO_2 mediante el método sol-gel con secado a presión ambiente y tratamientos térmicos posteriores. Los análisis mediante difracción de rayos X y espectroscopía Raman confirmaron la formación de la fase anatasa del TiO_2 a temperaturas de calcinación superiores a 650 °C, siendo más evidente en las muestras tratadas a 750 y 850 °C.

La implementación de espectroscopía Raman polarizada permitió obtener por separado las componentes isotrópica y anisotrópica de la señal Raman. El procesamiento isotrópico generó espectros más simplificados, con menor influencia de modos anisotrópicos y mejor diferenciación de las contribuciones estructurales del material.

Los resultados mostraron que algunos modos vibracionales característicos de la anatasa, especialmente el modo a 142 cm^{-1} (E_{1g}), presentan un comportamiento predominantemente anisotrópico, mientras que el espectro isotrópico permitió resaltar contribuciones posiblemente relacionadas con vibraciones más simétricas y con regiones estructuralmente desordenadas de la matriz de SiO_2.

Finalmente, se concluye que la espectroscopía Raman isotrópica constituye una herramienta complementaria y prometedora para el análisis estructural de materiales con señales Raman débiles o complejas, como los aerogeles híbridos TiO_2-SiO_2, ya que mejora la interpretación espectral y facilita la identificación de cambios asociados a la cristalinidad y organización estructural del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Amonkosolpan, J., Wolverson, D., Goller, B., Polisski, S., Kovalev, D., Rollings, M., Grogan, M. D. W., & Birks, T. A. (2012). Porous silicon nanocrystals in a silica aerogel matrix. *Nanoscale Research Letters*, *7*(1), 397. https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-397
2. Castro, J., Vilanueva, A. E., & Ortiz, C. M. (2013). Raman spectroscopy and its applications. *Optica Pura y Aplicada*, *46*(1), 83–95. https://doi.org/10.7149/OPA.46.1.83
3. Chipman, R. A., Young, G., & Lam, W. S. T. (2018). *Polarized light and optical systems*. Taylor and Francis, CRC Press.
4. Hecht, E. (2017). *Optics* (5 ed). Pearson Education, Inc.
5. Jung, H.-N.-R., Parale, V. G., Choi, H., Kim, J., Lee, W., Kim, S.-H., Jung, W. K., & Park, H.-H. (2024). Investigation of compound state of SiO2-TiO2 aerogel synthesized through controlled sol-gel reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, *980*, 173561. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173561

6. Moussaoui, R., Elghniji, K., ben Mosbah, M., Elaloui, E., & Moussaoui, Y. (2017). Sol–gel synthesis of highly TiO2 aerogel photocatalyst via high temperature supercritical drying. *Journal of Saudi Chemical Society*, *21*(6), 751–760. https://doi.org/10.1016/j.jscs.2017.04.001
7. Orlando, A., Franceschini, F., Muscas, C., Pidkova, S., Bartoli, M., Rovere, M., & Tagliaferro, A. (2021). A Comprehensive Review on Raman Spectroscopy Applications. *Chemosensors*, *9*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/chemosensors9090262
8. Petrov, D., & Matrosov, I. (2023). Natural Gas Analysis Using Polarized Raman Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, *95*(25), 9409–9414. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c00196
9. Rankin, J. M., Baker, S., & Klabunde, K. J. (2014). Mesoporous aerogel titanium oxide–silicon oxide combinations as adsorbents for an azo-dye. *Microporous and Mesoporous Materials*, *190*, 105–108. https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.01.027
10. Riegel, B., Hartmann, I., Kiefer, W., Groβ, J., & Fricke, J. (1997). Raman spectroscopy on silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *211*(3), 294–298. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(96)00639-4
11. Smith, E., & Dent, G. (2019). *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. John Wiley & Sons.
12. Tinoco Navarro, L. K., & Jaroslav, C. (2023). Enhancing Photocatalytic Properties of TiO2 Photocatalyst and Heterojunctions: A Comprehensive Review of the Impact of Biphasic Systems in Aerogels and Xerogels Synthesis, Methods, and Mechanisms for Environmental Applications. *Gels*, *9*(12), Article 12. https://doi.org/10.3390/gels9120976
13. Zhao, L., Wang, S., Wang, Y., & Li, Z. (2017). Thermal stability of anatase TiO_2 aerogels. *Surface and Interface Analysis*, *49*(3), 173–176. https://doi.org/10.1002/sia.6103
14. Zhi, M., Tang, H., Wu, M., Ouyang, C., Hong, Z., & Wu, N. (2022). Synthesis and Photocatalysis of Metal Oxide Aerogels: A Review. *Energy & Fuels*, *36*(19), 11359–11379. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c01049

LENTES DE FRESNEL ELECTRÓNICAS EN PANTALLA DE CRISTAL LIQUIDO

J. Fernando Delabra-Deloya, Pedro Y. Calderón-Enciso, Francisco G. Peña-Lecona, Jesús Muñoz-Maciel, Miguel Mora-González

Centro Universitario de Los Lagos, Universidad de Guadalajara.
miguel.mora@academicos.udg.mx.

RESUMEN

Tradicionalmente, los sistemas ópticos utilizados para enfocar contienen una serie de lentes acopladas, que en conjunto tienen una distancia focal. Estos sistemas pueden cambiar su distancia focal, cuando el mecanismo que sujeta las lentes es accionado para modificar la separación que hay entre las mismas lentes. Estos tipos de sistemas ópticos son voluminosos, con movimientos mecánicos que pueden afectar a los arreglos experimentales en los que puedan estar instalados. Una lente de Fresnel es un elemento óptico diseñado por una serie de anillos concéntricos, dicha lente se caracteriza por ser planas y ligeras, con distancias focales del orden de centímetros. Los moduladores espaciales de luz (SLM por sus siglas en inglés) son una buena alternativa para simular lentes con distancias focales similares a las de las lentes de Fresnel. Entre los SLM se encuentran las pantallas de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés), que son dispositivos fáciles de programar. El objetivo del presente trabajo es programar anillos concéntricos dinámicos en una pantalla de cristal líquido, para con esto simular una lente de Fresnel electrónica con enfoque dinámico. El arreglo experimental propuesto, consiste en los siguientes dispositivos. Un diodo Laser que funciona como sistema de iluminación. Una lente positiva colimadora, cuya distancia focal es la distancia entre el diodo láser y la misma lente. La luz colimada ilumina una LCD nemática de la marca Kopin, la cual actúa como lente electrónica de Fresnel, cuya resolución es 320x240 píxeles y trabaja en modo transmisión. Para medir la distancia focal de la lente dinámica de Fresnel, se coloca una webcam sobre un riel móvil, observando el punto de convergencia del rayo de luz blanca. Los resultados obtenidos, muestran que la distancia focal de la lente electrónica se modifica al cambiar el periodo de los anillos concéntricos programados en la LCD. Se observó que conforme se incrementa el periodo, la distancia focal crece, en consecuencia, si se disminuye el periodo la distancia focal disminuye. Existe una relación inversamente proporcional entre el número de círculos concéntricos generados en la placa zonal de Fresnel y las distancias focales obtenidas. Es decir, al incrementar la cantidad de círculos concéntricos, la distancia focal disminuye, lo que demuestra como esto influye en el comportamiento de convergencia del frente de onda.

INTRODUCCIÓN

De manera convencional, los sistemas ópticos empleados para el enfoque están constituidos por un conjunto de lentes acopladas que determinan una distancia focal. La variación de esta distancia focal se logra mediante un mecanismo que ajusta la separación entre las lentes. Sin embargo, este tipo de configuraciones ópticas suele presentar un tamaño considerable y requiere movimientos mecánicos, los cuales pueden interferir o generar perturbaciones en los montajes experimentales donde se encuentran integrados

En 1997, B. Berge, J. Peseux, patentan en Francia un sistema capaz de modificar la distancia focal variable de una lente, haciendo uso de la aplicación de gradientes de humectabilidad, para controlar la forma del brode de la gota; en su caso, un círculo centrado de radio variable.[1] En 2002 se utiliza rejillas digitales para evaluar elementos ópticos con la prueba de Ronchi. En este se demuestra que la frecuencia de la rejilla digital puede ser alterada sin necesidad de manipulación física.[2] En 2018, Hasan N. et al. Implementan gafas ligeras con autoenfoque que aumentan el rango de acomodación, restaurando parcial o totalmente la función visual normal. Su método utiliza cristales líquidos con índice de refracción variable, además de incluir superficies deslizantes mecánicas y lentes deformables.[3]

Con estos antecedentes pensamos en la posibilidad de desarrollar un método que nos permitiera automatizar la modificación de la distancia focal. En este trabajo, se empleó un diodo Laser como fuente de iluminación que es colimada por una lente colocada a su distancia focal para que incida en la LCD; en la cual desplegamos una imagen de anillos concéntricos para observar el comportamiento de estos. Finalmente se obtuvieron resultados confiables que demuestran un sistema óptico capaz de modificar la convergencia del haz de luz, logrando cambiar la distancia focal utilizando diferentes simulaciones de las lentes de Fresnel.

TEORÍA

Una lente de Fresnel es un elemento óptico directivo formado por zonas alternadas transparentes y opacas, las cuales generan interferencia constructiva de la luz que incide sobre ella, concentrándola en un punto focal específico.[4] Se puede decir que una placa zonal de Fresnel actúa como una lente con una multitud de distancias focales tanto positivas (convergentes) como negativas (divergentes).[5] Una representación de un sistema óptico con una lente de Fresnel proyectada en una LCD nemática se muestra en la figura 1.

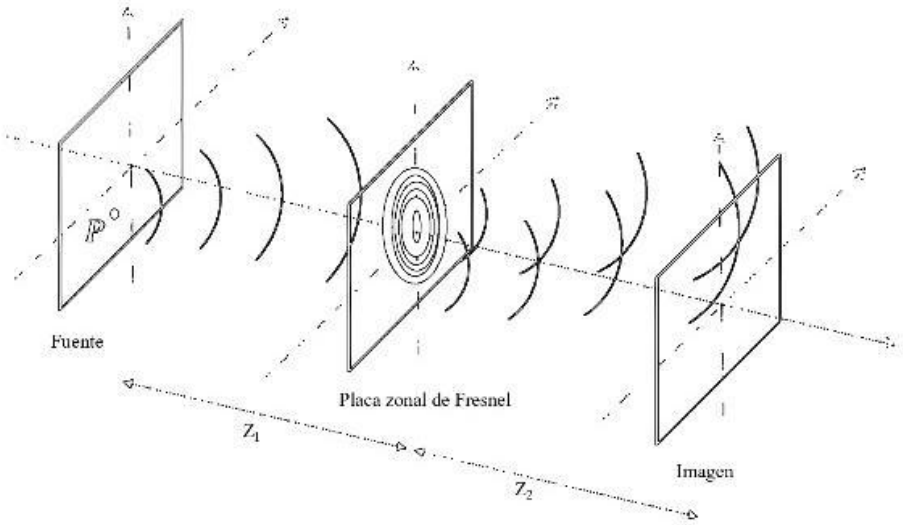


Figura 1. Diagrama general del sistema óptico basado en una placa zonal de Fresnel**.**

El cristal líquido es una estructura molecular que posee propiedades físicas tanto de sólidos como de líquidos. El material con el que está fabricado un cristal líquido, por lo general está compuesto de un alto número de moléculas anisotrópicas.[6,7] Las LCDs nemática corresponde a la configuración mecánica más empleada. El nombre “nemática” significa “hebra de hilo”, lo cual puede comprenderse al observar la estructura cristalina presentada en la figura 2.[8] En ella, las moléculas presentan una orientación paralela a lo largo de todo el volumen del cristal, mientras que su centro de gravedad se distribuye de manera aleatoria dentro de toda la estructura cristalina.[9]

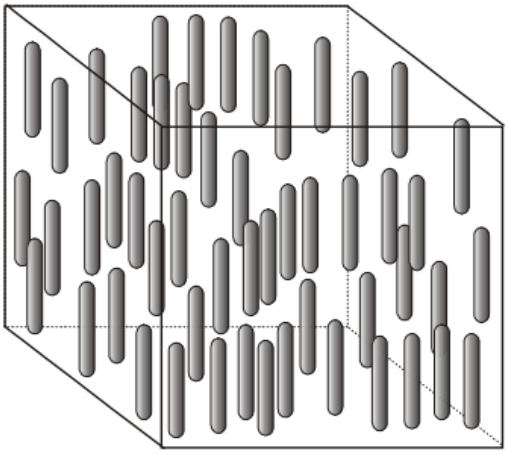


Figura 2. Estructura molecular de un cristal líquido nemática.[2]

La orientación de sus moléculas, así como sus propiedades ópticas, pueden controlarse mediante la aplicación de impulsos eléctricos. La estructura cristalina neumática presenta propiedades ópticas de gran relevancia, entre las que destaca el giro de sus moléculas como resultado de una actividad óptica inducida (*Twist o* giro molecular).[2] El giro molecular es una propiedad mecánica característica de los cristales líquidos de tipo neumático, la cual se manifiesta cuando dicho cristal se dispone entre 2 placas de vidrio pulidas en direcciones distintas. Esa diferencia en la utilización del pulido provoca que las moléculas roten progresivamente al desplazarse desde la interfaz con el vidrio 1 hasta la interfaz con el vidrio 2, como se observa en la figura 3. Al inicio de esta rotación, el eje molecular se encuentra alineado con la dirección de pulido del primer vidrio, mientras que el al final queda orientada de forma paralela la dirección del pulido del segundo vidrio.[8]

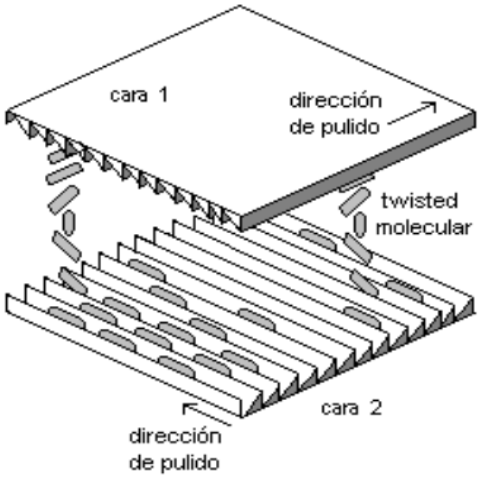


Figura 3. Representación esquemática de la rotación molecular entre las dos caras de una LCD.[2]

En términos generales, una LCD posee un polarizador lineal en cada una de las caras, cuyos ejes se encuentran orientados con determinado vuelo entre sí. Considerando que el polarizador y el analizador están posicionados a 90°, al aplicar un voltaje adecuado a las moléculas del que se asientan en la dirección del campo eléctrico.[10]

PARTE EXPERIMENTAL

Para la implementación del sistema de generación y manipulación de lentes de Fresnel mediante una LCD Kopin de baja resolución (320×240 píxeles, en modo de transmisión). Dicho dispositivo fue conectado y operados a través de una computadora Acer Aspire 5920. El entorno de programación se desarrolló en MATLAB® R2008. El montaje experimental aplicado consta de diodo Láser que es alimentando por una fuente de alimentación variable para atenuar la intensidad del haz de luz con el fin de no saturar la imagen de salida; una lente positiva con una distancia focal de 3cm; una lente positiva colimadora con una distancia focal de 15cm para proyectar el haz de luz sobre el plano de la LCD y registrar la salida con un cámara webcam Logitech® C920. Dicho dispositivo fue conectado a una computadora HP Victus.

RESULTADOS

Los resultados experimentales demostraron que, al modificar la cantidad de círculos concéntricos en el patrón de Fresnel mostrado en la LCD, el tamaño del haz proyectado cambiaba de manera apreciable. En ciertos patrones el haz tendía a concentrarse formando un punto más fino, mientras que en otros se expandía. Se realizo múltiples pruebas con diferentes cantidades de círculos concéntricos senoidales para observar su comportamiento, las cuales fueron: 9 círculos (ver Figura 4), 12 círculos (ver Figura 5), 21 círculos (ver Figura 6) y 24 círculos (ver Figura 7).

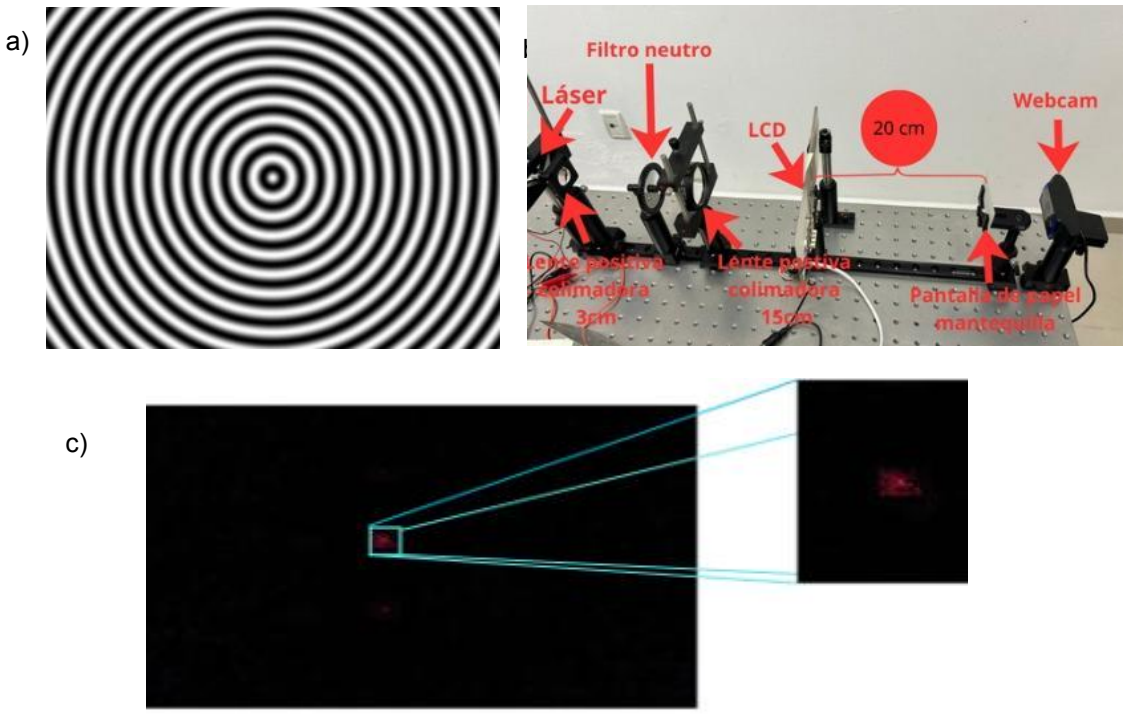


Figura 4. Primera prueba con 9 círculos senoidales: a) representación de la imagen proyectada en LCD; b) arreglo experimental utilizado; c) visualización del punto focal obtenido a 20 cm.

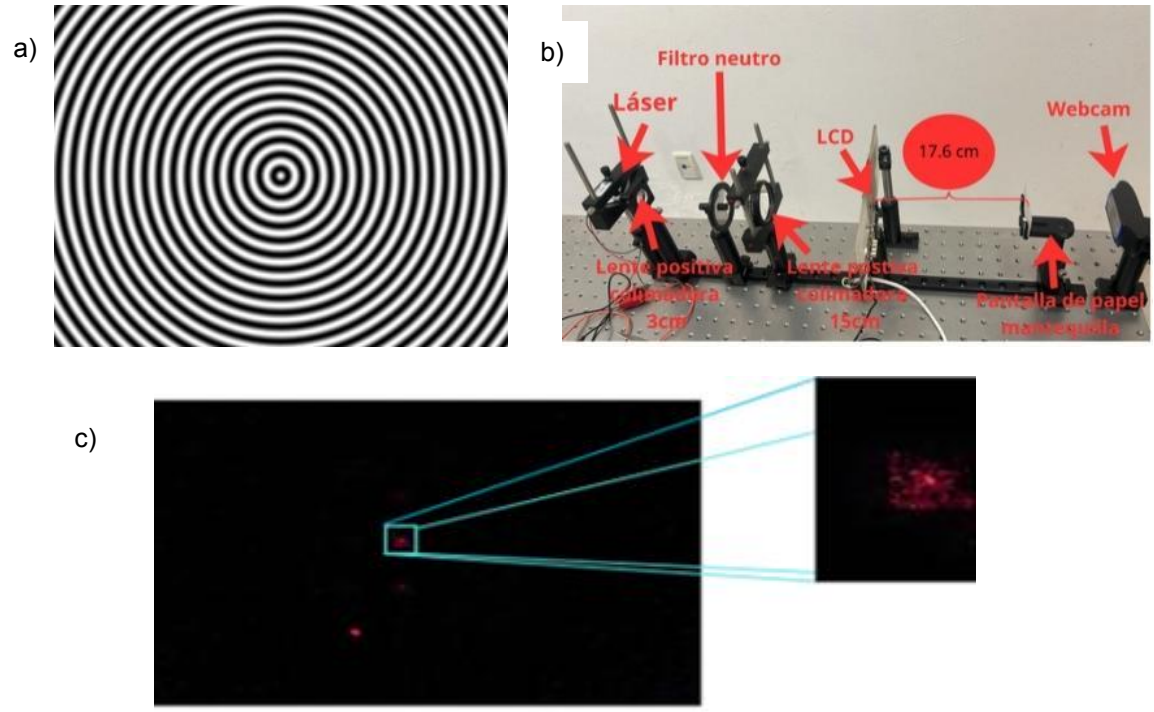


Figura 5. Segunda prueba con 12 círculos senoidales: a) representación de la imagen proyectada en LCD; b) arreglo experimental utilizado; c) visualización del punto focal obtenido a 17.6 cm.

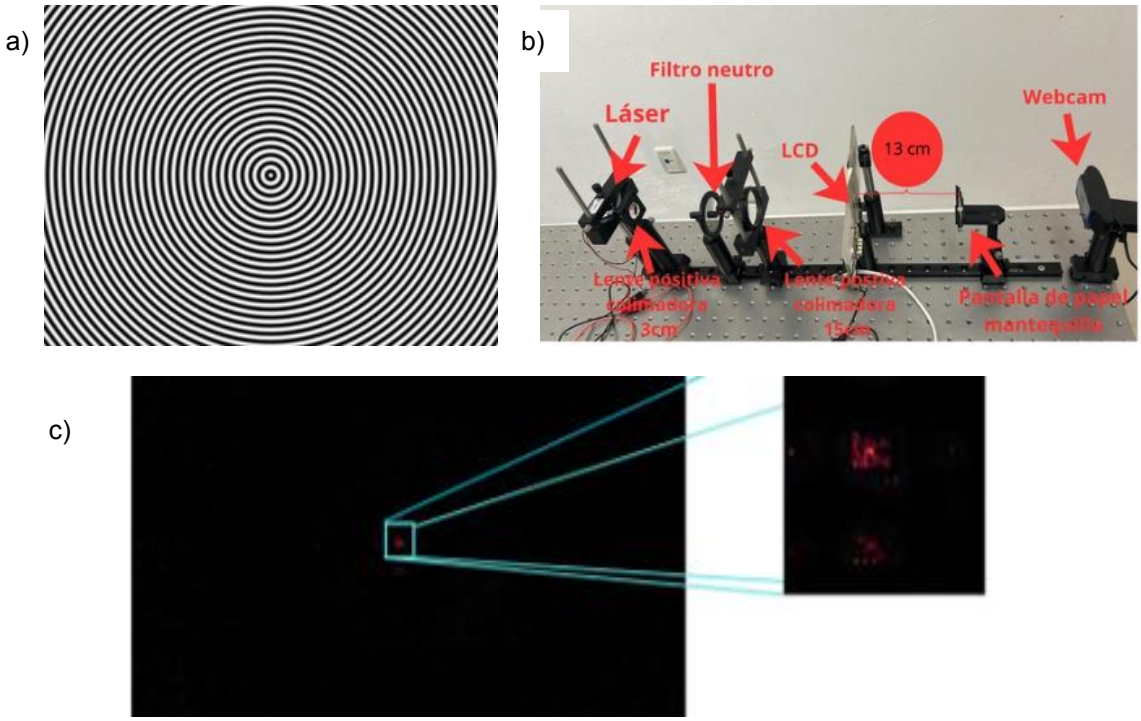


Figura 6. Tercera prueba con 21 círculos senoidales: a) representación de la imagen proyectada en LCD; b) arreglo experimental utilizado; c) visualización del punto focal obtenido a 13 cm.

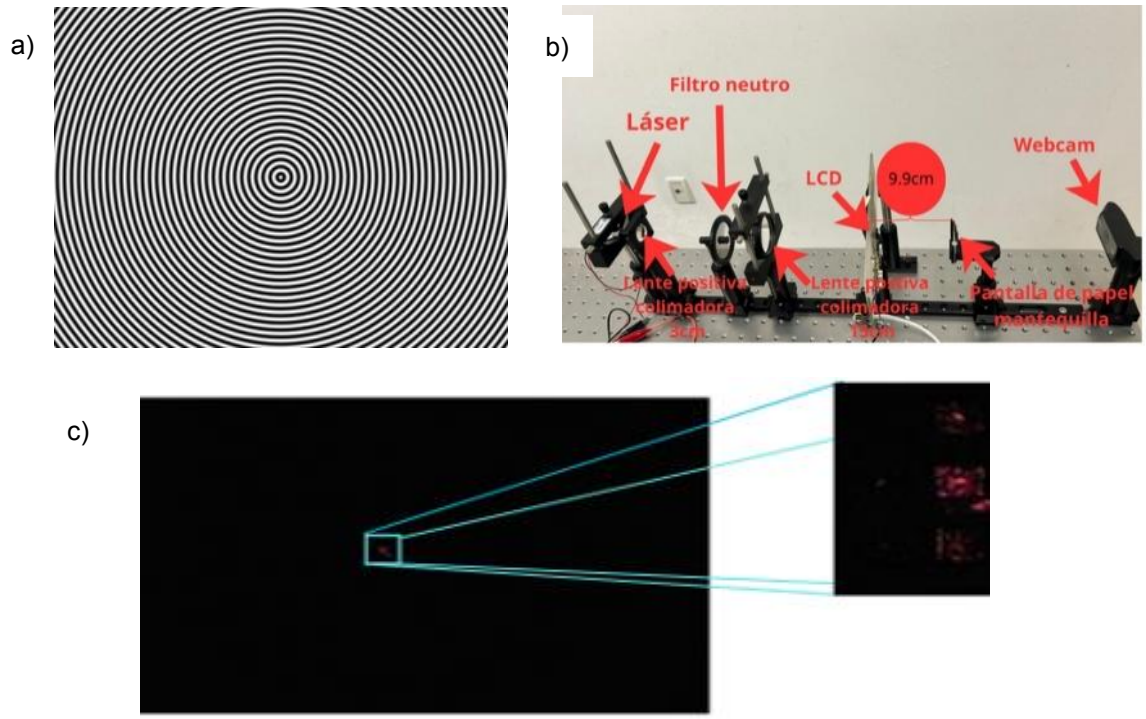


Figura 7. Cuarta prueba con 24 círculos senoidales: a) representación de la imagen proyectada en LCD; b) arreglo experimental utilizado; c) visualización del punto focal obtenido a 9.9 cm.

CONCLUSIONES

Se observó una relación inversa entre la cantidad de círculos concéntricos presentes en la placa zona de Fresnel y la distancia focal obtenida. Conforme aumente el número de círculos, la distancia focal se reduce, evidenciando la influencia de la estructura del patrón sobre la convergencia del frente de onda luminosa. A partir de estos resultados, se comprobó que una pantalla de cristal líquido puede utilizarse como un elemento óptico programable para modificar la propagación de luz mediante patrones digitales tipo Fresnel. La variación en el número de distribución de los anillos concéntricos produjo cambios visibles en el tamaño y constitución de las luminoso, evidenciando un efecto de enfoque óptico. Esto demuestra que la modulación óptica digital permite controlar dinámicamente ciertas propiedades del agua sin necesidad de sistemas mecánicos convencionales. Este estudio resalta la vialidad y potencial de las lentes digitales de Fresnel abriendo la puerta a futuras investigaciones enfocadas a aplicaciones en sistemas ópticos adaptativos, enfoque dinámico, entre otra. También, a la exploración de diseños de placas zonales para mejorar la eficiencia del enfoque.

BIBLIOGRAFÍA

1. Berge, B., Peseux, J. Lente focal variable controlada por voltaje externo: Una aplicación de la electrohumectación. Eur. Phys. J. E 3, 159–163 (2000).
2. Mora González, M. (2002). Aplicaciones De Cristales Líquidos A Pruebas Ópticas No Destructivas [Tesis De Doctorado, Universidad De Guanajuato].
3. Hasan, N., Karkhanis, M., Ghosh, C., Khan, F, Ghosh, T., Kim, H., Mastrangelo, C.H. Lightweight Smart Autofocusing Eyeglasses. Proc SPIE Int Soc Opt Eng. 2018 Jan-Feb;10545:1054507. doi: 10.1117/12.2300737. Epub 2018 Feb 22. PMID: 32773917; PMCID: PMC7409531.
4. Li, Y., de La Rochefoucauld, O., & Zeitoun, P. (2020). Simulación del rendimiento de la formación de imágenes mediante placas de zona de Fresnel con diferentes números de zonas. Sensors , 20 (22), 6649. https://doi.org/10.3390/s20226649

5. Malacara, D. (2015). Óptica básica (3a ed). Fondo de Cultura Económica.
6. H. Finkelmann, H. J. Kock, “Liquid Crystal Side Chain Polymers: Properties and Aspects for Applications”, Disp. Tech. 1, 81-94 (1985).
7. I.C. Khoo, Y.R. Shen, “Liquid crystals: nonliear ooptical properties and processes”,
Opt. Eng. 24(4), 579-585 (1985).
8. J.L. Fergason, “Liquid Crystals”, Sci. Am., 211(2), 77-82 (1964).
9. J.W. Goodman, “Introduction to Fourier Optics”, McGraw Hill, Cap. 7 Wavefront Modulation, segunda edición, 186-188 (1996).
10. W.E. Haas, “Liquid Crystal Display Research: The First Fifteen Years”, Mol. Cryst. Liq.
Cryst. 94, 1-31 (1983).

PLANEACIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MINICÁMARA DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN IONIZANTE

Grecia Ameyalli Félix Jonguitud[1], J. Félix[2]

[1]Universidad de Guanajuato División de Ciencias e Ingenierías, [2]Laboratorio Internacional de Partículas Elementales.
felix@fisica.ugto.mx, ga.felixjonguitud@ugto.mx

RESUMEN

Los usos de la radiación ionizante son múltiples en estos días, desde ciencia básica hasta aplicaciones industriales y medicina; por estas razones, las técnicas de detección de la radiación ionizante son de interés mundial y social. Presentamos la planeación, el diseño, la caracterización, y operación de una minicámara de detección de radiación ionizante hecha a base de un tubo extruido de Aluminio estructural de 0.1 cm de espesor de pared, 10.16 cm de largo y sección transversal (2.54 cm) (2.54 cm).
Lleva una fibra metálica de cobre, coaxial al tubo, recubierta de estaño, 0.2 mm de diámetro y tensada a 200 g. Es operada con distintos gases como aire, Ar y otros. Por un extremo se energiza con voltajes de 0 V a 3000 V_{dc}, y por el otro extremo se leen las señales producidas en el gas por la radiación ionizante incidente. Presentamos detalles técnicos del diseño, de la caracterización, y algunos resultados físicos preliminares al ser operada con aire y expuesta a los rayos cósmicos.

INTRODUCCIÓN

La radiación Ionizante es la radiación compuesta por fotones, o partículas masivas, que al interactuar con la materia producen iones, tanto de manera directa como indirecta; ésta extrae los electrones de sus estados ligados al átomo. Este tipo de radiación está compuesta por los rayos gamma, rayos X y la parte más energética ultravioleta del espectro electromagnético, además, entre las partículas subatómicas que la componen se encuentran las partículas alfa, las partículas beta y los neutrones y por otro lado se encuentran las partículas cósmicas secundarias, que se producen después de que los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera terrestre, aquí es donde se encuentran los muones, mesones y los positrones.
En este trabajo se muestra la planeación, el diseño, la construcción, la caracterización, y resultados físicos muy preliminares, de una minicámara de detección ionizante.

TEORÍA

Planeación

Se ideó una cámara de ionización monoalámbrica, compacta, manejable, simple y que opere a atmósfera abierta (con aire) y cerrada, es decir, que pueda a su vez operar con mezclas especiales de gases comerciales; debe ser de dimensiones 2.54 cmx 2.54 cmx 11 cm, construida con materiales comerciales. Contó con electrónica compacta y conectores profesionales para evitar que existan riesgos eléctricos para el operador. Dicha cámara debe servir tanto para investigación, como para enseñanza y divulgación de la ciencia. El diseño es totalmente original, y está en proceso de patente

Diseño

El diseño se muestra en la Figura 1. Es una cámara monoalámbrica basada en un tubo de Aluminio estructural de 11 cm de largo, 2.54 cm x 2.54 cm de sección transversal, y 0.1 cm de grueso de pared. Leva un cabezal en cada extremo del tubo, impreso en 3D, de plástico PLA (ácido polilláctico), este elemento sirve de base para tender coaxialmente una fibra metálica coaxial al tubo y soldarla a sendas placas electrónicas pegadas al cabezal por el exterior; -una para aplicar el alto voltaje y la otra para leer la señal- también son base para insertar tubos de plásticos para inyectar gas. A las

placas electrónicas se suelda una base para conector de alto voltaje y una base para conector para leer la señal producida por la incidencia de radiación ionizante.

PARTE EXPERIMENTAL

CONSTRUCCIÓN

Los materiales usados para el prototipo fueron un tubo de aluminio de 11cm de largo, dos cabezales de PVC impresos en 3D con un ancho de 2.54 cm y un alto de 5.08 cm de altura, una fibra de cobre recubierta de estaño -para evitar oxidación- con 0.2 mm de diámetro, dos aditamentos de cobre, y dos PCB; las cuales tienen una resistencia y los conectores para la fuente de alto voltaje y el osciloscopio.

Comenzamos con la preparación del tubo de aluminio, el cual fue lijado por dentro hasta alcanzar la eliminación de óxido de aluminio y posteriormente, la conductividad eléctrica. Mientras el tubo era lijado, los cabezales de PVC fueron impresos y una vez el tubo estuvo listo, los cabezales se lijaron para lograr insertarlos con un cierre hermético.

Con una broca se perforaron los cabezales para obtener dos orificios, uno de 4mm colocado en la esquina inferior derecha del cabezal y otro de 0.3mm colocado el en centro de este. En el orificio de 4mm se colocó un pequeño tubo blanco que serviría posteriormente para la inserción de gas a la cámara sellada.

Una vez el cuerpo de la cámara estuvo terminado, se comenzó a trabajar en las PCB; se soldaron los caminos, las resistencias y un capacitor en una de ellas. Para colocar los aditamentos de cobre en la PCB. estos se lijaron para quitar el óxido de cobre y fueron soldados a las PCB, ulteriormente los conectores fueron colocados y soldados a las PCB; estas fueron pegadas a los cabezales de cobre con un pegamento para plásticos.

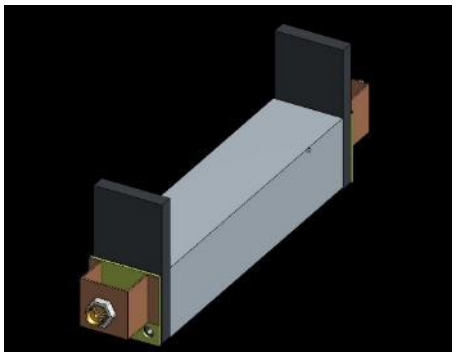


Figura 1. Diseño final del prototipo

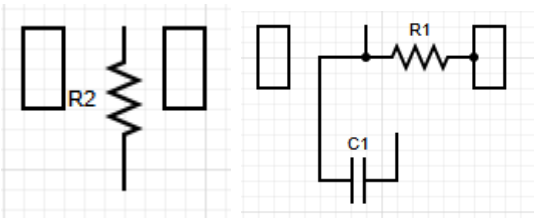


Ilustración 1 Circuito eléctrico PCB



Ilustración 2 Aditamentos de cobre y conectores

Antes de sellar la cámara completamente, se soldó la fibra de cobre al interior de esta, la cual fue tensada con un peso de 200g y soldada a un extremo, luego fue tensada por el extremo restante y soldada.

Caracterización
Se midió la conductividad eléctrica del prototipo, comprobando que existiera de cabezal a cabezal y de los conectores hacia la fibra de cobre en ambos lados del prototipo. Además, se verificó que el prototipo no contara con conductividad eléctrica en el exterior del prototipo y que no existiera conductividad de los cabezales hacia el exterior del tubo. Una vez estas medidas estuvieron en orden, se conectó el prototipo a la fuente de alto voltaje y al osciloscopio para probar cuál era el voltaje mínimo con el cual la cámara era capaz de funcionar.

El prototipo contó con dos pruebas preliminares y, en la primera funcionó con 3.65 x 600 V y en la segunda funcionó con 6.25 x 600 V.

Por último, la cámara al momento de la toma de datos funcionó con 3.05x600 V.
Para estas mediciones y resultados, la cámara funcionó a atmósfera abierta.

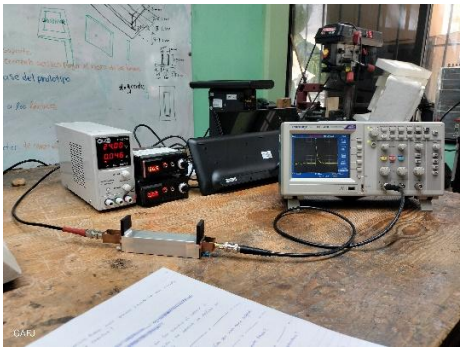
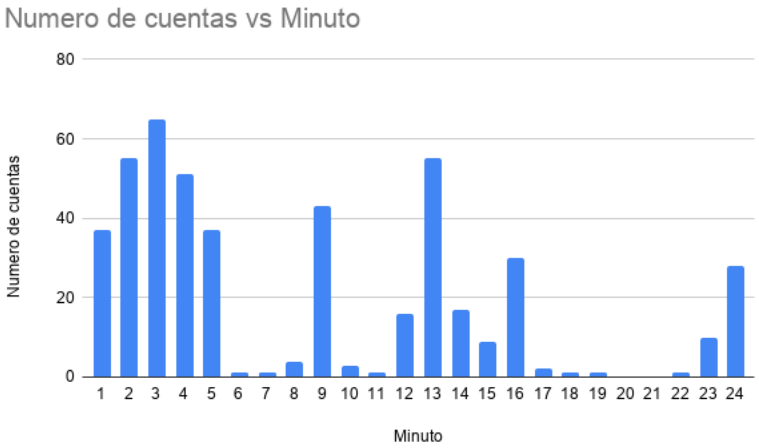


Ilustración 3 Cámara de detección funcionando

RESULTADOS
La cámara se conectó al osciloscopio y durante 24 minutos se recopilaron datos con la ayuda de un video grabado a 1080-60fps. Los datos fueron analizados y se descartaron los que se pudieran considerar como ruido, de los cuales se lograron recopilar 470 datos.



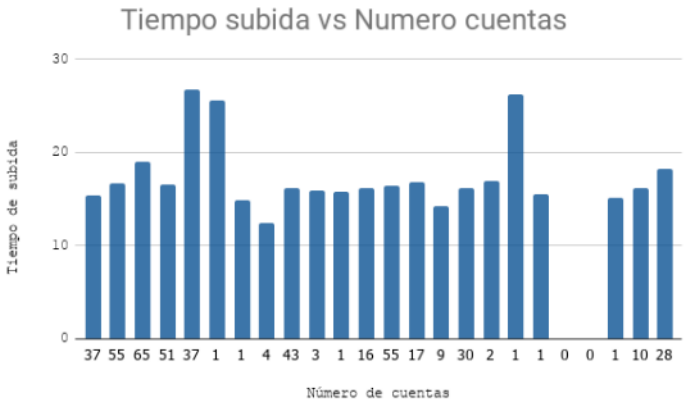
Gráfica 1. Cuentas detectadas por minuto.

Minuto	Número de cuentas
1	37
2	55
3	65
4	51
5	37
6	1
7	1
8	4
9	43
10	3
11	1
12	16
13	55
14	17
15	9
16	30
17	2
18	1
19	1
20	0
21	0
22	1
23	10
24	28

Tabla 1. Número de cuentas por minuto.

Número de cuentas	Tiempo de subida (μs)
37	15.4
55	16.7
65	19
51	16.6
37	26.8
1	25.6
1	14.9
4	12.5
43	16.2
3	15.91
1	15.77
16	16.2
55	16.4
17	16.8
9	14.26
30	16.2
2	16.9
1	26.2
1	15.6
0	0
0	0
1	15.1
10	16.16
28	18.3

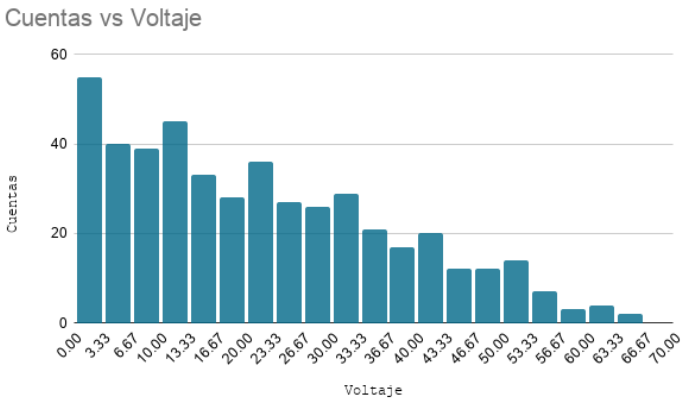
Tabla 2. Tiempos de subida.



Gráfica 2. Tiempo que permaneció la cuenta siendo visible.

Voltaje (mV)	Cuentas
92	1
138	2
100	3
110	4
78	2
80	5
72	6
76	7
74	13
82	9
84	10
144	36
124	37
210	1
154	1
148	1
128	2
266	3
146	4
174	1
142	2
176	3

Tabla 3. Voltajes capturados y el número de cuentas con dichos voltajes.



Gráfica 3. Cuantas cuentas tuvieron el mismo voltaje.

CONCLUSIONES

La planeación, diseño, construcción y caracterización de la cámara de detección fueron exitosamente alcanzados y cumplidos. La cantidad de datos para el tiempo de detección fueron buenos y las señales fueron claras. Se concluyó en base a observación que ningún disparo de datos es uniforme en el tiempo ni tienen la misma amplitud siempre, aunque los tiempos de subida se llegan a repetir.

BIBLIOGRAFÍA

1. Félix, J. F. (2025). *Notas de Física Cuántica*. Comunicación privada.
2. Cosmic Rays - Introduction. (s. f.). https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/cosmic_rays1.html

EFECTO DEL ESCAPE DE FOTONES IONIZANTES EN DIAGNÓSTICOS DE REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR CON MODELOS 3D

Jesús López-Hernández[1], Elizabeth Galindo-Linares[2],

[1]Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Universitarios S/N C. U. 80040, Culiacán Rosales, México., [2]Universidad Autónoma de Sinaloa.
jesus.lopezh@uas.edu.mx

RESUMEN

Las regiones de formación estelar son importantes para entender el origen y la evolución de las galaxias, así como el enriquecimiento químico del Universo. Las herramientas utilizadas para su estudio se basan en la suposición de que los fotones ultravioleta, capaces de ionizar el gas circundante son completamente absorbidos y procesados en la nebulosa. La evidencia observacional indica que en algunos objetos parte de la radiación ionizante logra escapar al medio interestelar. La fracción que escapa (f_{esc}) modifica el contenido energético de la nebulosa y puede llevar a una incorrecta determinación de las condiciones físicas. Este trabajo estudia el efecto de f_{esc} sobre diagnósticos empleados rutinariamente.

Utilizamos códigos de fotoionización para simular la estructura de ionización en regiones de formación estelar. Los modelos son unidimensionales, iniciando en el lado irradiado por la estrella y terminando en la zona de fotodisociación, donde ya no hay fotones para ionizar el gas, tal que la región es limitada por radiación y todos los fotones ionizantes son procesados localmente. Expandimos los resultados a una estructura tridimensional mapeando el perfil 1D radialmente en una esfera, la cual es proyectada sobre la bóveda celeste para comparar con observaciones. Implementamos el escape de fotones eliminando las capas externas en la estructura esférica a diferentes niveles, de tal forma que una fracción de la radiación ionizante logra salir de la nebulosa, la cual es ahora acotada por materia. Las condiciones iniciales de los modelos comprenden variaciones en metalicidad, polvo y temperatura de la estrella ionizante.

El efecto de la fracción de escape fue caracterizado en el diagrama de diagnóstico [NII]/Hα vs. [OIII]/Hβ, donde encontramos un cambio en la posición de la nebulosa como función de la fracción de escape. La nebulosa se mueve hacia regiones de mayor excitación y menor abundancia, lo cual puede interpretarse erróneamente como un aumento en la temperatura de la estrella central o una disminución del contenido de metales. También utilizamos la estimación de temperatura de oxígeno con el método directo, utilizando la razón [OIII]λ4363/[OIII]λ5007, obteniendo una disminución de la temperatura estimada del gas conforme la fracción de escape aumenta.

Encontramos que la fracción de escape produce una variación en razones de líneas con diferentes grados de ionización, particularmente en [OIII]/[SII], [OIII]/[OII], [NII]/Ha y [OIII]/Hb, utilizadas ampliamente en varias herramientas de diagnóstico. Tal variación lleva a derivar valores incorrectos para diferentes parámetros de la nebulosa. El error se explica en términos de la estructura interna, donde las especies de alta ionización dominan la parte central, mientras que en las regiones externas dominan las de bajo potencial de ionización. Este estudio abre la puerta a redefinir las herramientas de diagnóstico para incluir el escape de fotones ionizantes. Se propone el uso de razones de línea con similar potencial de ionización para aminorar el efecto del escape de fotones.

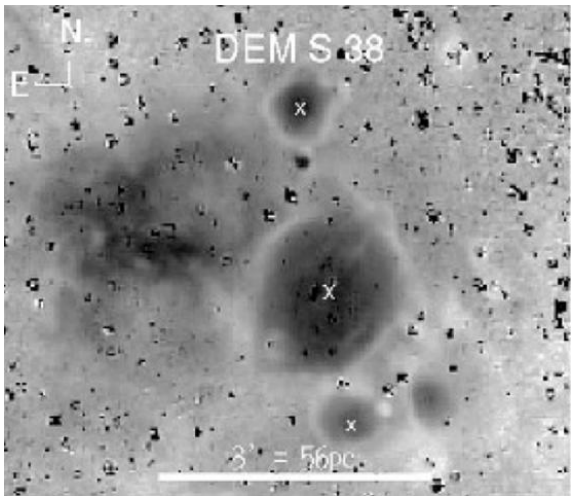
INTRODUCCIÓN

Las estrellas masivas ($M > 8M_{sol}$) son capaces de producir una gran cantidad de radiación ionizante ($h\nu > 13.6$ eV), la cual interacciona con el medio interestelar, contribuyendo de manera significativa en la definición de su estructura y morfología, así como el balance energético, incluso a nivel galáctico. La teoría estándar de formación estelar establece que la radiación ionizante está contenida

dentro de un volumen limitado, el cual en condiciones ideales tiene geometría esférica y es conocido comunmente como esfera de Strömgren (Strömgren, 1939). Dentro de la esfera el hidrógeno se encuentra totalmente ionizado, mientras que fuera es neutro. La transición entre ambos estados es un cáscara delgada conocida como la zona de foto-disociación (PDR), la cual se encuentra después del frente de ionización y donde los fotones tienen energía menor a 13.6 eV, logrando ionizar elementos con bajo potencial, así como disociar moléculas (Anderson, et al. 2009)

Bajo estas consideraciones, la estructura de ionización está bien definida así como el balance energético, sin embargo evidencia observacional indica que no todas las regiones de formación estelar tienen este comportamiento.

Mediante el uso de la técnica del Mapeo del Parameto de Ionización (IPM), Pellegrini et al. (2012) demostró que analizando la razón de mapas de líneas con diferente potencial de ionización es posible detectar la existencia de la zona de transición entre gas ionizado y neutro. En particular la técnica se aplicó en las Nubes de Magallanes, con datos del Magellanic Cloud Emission Line Survey (MCELS: Smith et al. 1998), tomando el mapa de azufre [SII]λ6717,6731, que tiene bajo potencial de ionización, dividido entre el mapa de oxígeno [OIII]λ5007, que tiene alto potencial de ionización. Ejemplos del mapa resultante de la razón [SII]/[OIII], de la Nube Menor de Magallanes, se muestran en las figuras 1 y 2. En la Figura 1 se tiene la región de formacióne estelar denominada DEM S38, donde se observan varias regiones que muestran claramente la zona de transición, dominada por las líneas de azufre una vez ionizado [SII]. Estas regiones, marcadas con una X se consideran como ópticamente gruesas a la radiación ionizate o delimitas por radiación. En esta misma figura también se observa en la parte izquierda una zona obscura, que no tiene el borde de transición, está dominada por la línea de alta ionización [OIII] y la radiación ionizante no está contenida por lo que se considera una región ópticamente gruesa o limitada por materia.



Figra 1. Mapa de la razón de líneas [SII]/[OIII], con la región DEM S38 al centro. Las regiones ópticamente gruesas se indican con una X. La región en la izquierda no muestra la zona de transición por lo que se considera opticamente delgada. La línea horizontal muestre la escala en segundos de arco y parsecs a la distancia de la Nube Menor (figura tomada de Pellegrini et al. 2012).

En la Figura 2 se muestra la región DEM S 159, la cual exhibe comportamiento híbrido ya que una parte tiene una zona de transición y otra parte no. Estas regiones se clasifican como tipo ampolla o blister. Esta región nos indica que una posible clasificación de la profundidad óptica de las regiones de formación estelar no es tan simple como decir que es gruesa o delgada. Una misma región puede tener una cobertura parcial de la zona de transición por lo que la fracción de escape puede variar. Además se debe considerar que la técnica solamente detecta el borde de transición en el borde proyectado sobre el plano del cielo. Puede haber ausencia del borde en la zona central pero no sería detectable por esta metodología.

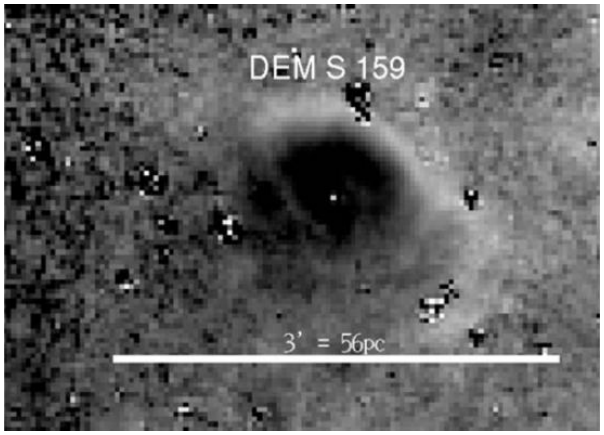


Figura 2. Similar a la figura 1 pero centrado en la región DEM S 159, la cual muestra zonas opticamente gruesas y delgadas (figura tomada de Pellegrini et al. 2012).

Las herramientas de diagnóstico tradicionales asumen que la región de formación estelar es opticamente gruesa, es decir, suponene que toda la radiación ionizante es reprocesasa dentro de la región, produciendo el espectro observado. Ante la evidencia observacional, que no todas las regiones son gruesas y que alguna pueden tener escape de fotones ionizantes (f_{esc}) surge la pregunta de cúal es el efecto de que no todos lo fotones ionzantes sean procesados in situ.

TEORÍA

La estuctura de ionización en regiones de formación estelar se puede trazar mediante la distribución radial de abundancias iónicas, esto bajo la suposición de una geometría con simetría esférica, con la estrella fuente localizada en el centro. Se espera que las especies con alto potencial de ionización, como O^{++}, S^{++} sean dominantes en la parte central, que disminuyan conforme la distancia a la estrella aumenta y sean débiles en el borde de transición. Por otro lado las especies con bajo de potencial de ionización, como S^{+}, N^{+} son casi inexistentes en la parte central pero aumentan con la distancia a la fuente ionizante, alcanzando un máximo y siendo dominantes en la zona externa.

Mediante el uso de modelos de fotoionización, es posible simular la estuctura interna de la nebulosa. En este trabajo utilizamos el código Cloudy (Gunasekera, et al., 2025), el cual produce soluciones de nebulosas ionizadas en una dimensión. Cloudy toma valores de la configuración inicial, los cuales incluyen la definición de la fuente ionizante, así como características del gas circundante como densidad, composición química, contenido de polvo, turbulencia, entre otras propiedades. Un ejemplo de la estructura de ionización se muestra en la Figura 3, que es el resultado del modelo de fotoionización con las condiciones iniciales indicadas en la Tabla 1

Parámetro	Valor
Fuente ionizante	Cuerpo negro
Temperatura	40600 [K]
Lumiosidad	10^{39} [erg s-1]
Radio interno	10^{18} [cm]
Abundancias:	Región HII (Orión)

Tabla 1. Parámetros iniciales de una de las simulaciones realizadas con Cloudy. Se deben especificar las caracteríasticas de la fuente ionizante, así como del gas circundante.
La figura 3 muestra la distribución radial de varias especies con diferente potencial de ionización, reproduciendo el comportamiento esperado. Las especies de alta ionización dominan la parte central

y las de baja ionización son preponderantes en la zona externa. En la figura la distancia está normalizada al radio de Strömgren, que indica el fin del frente de ionización y la zona de transición. Las líneas verticales indican diferentes profundidades ópticas, de 0.3, 0.5 y 1.0 para la radiación ionizate. Esta se estima de la integración del continuo de Lyman del modelo.

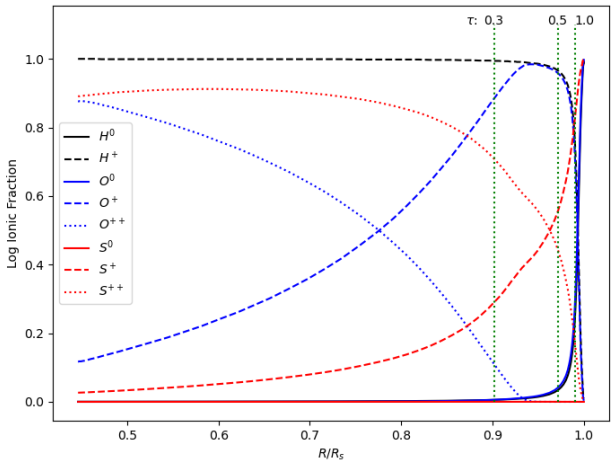


Figura 3. Distribución radial de las fracciones ionicas para las diferentes especies indicadas en la leyenda. La distancia a la fuente ionizate está normalizada al Radio de Strömgren (R_S). Las líneas verticales indican diferentes produndidades ópticas para la radiación ionizante (τ = 0.3, 0.5 y 1.0).

Para modelar el escape de fotones ionizantes, la metodología consiste en tomar los resultados de la simulación y recortarlos en la parte externa, de manera que cuando los fotones llegan a esta zona simulan el escape al medio interestelar, dejando de contribuir a la estructura y formación del espectro de la nebulosa. De la Figura 3 se puede ver que la zona más externa tiene gran contribución de especies de baja ionización por lo que si se descarta esta parte las herrmientas tradicionales darán un resultado erróneo. El objeitvo del presente trabajo es caracterizar tal error en diagnósticos de temperatura electrónica del gas, de excitación y abundancias. Una descripción detallada del proceso se presenta en la siguiente sección.

PARTE EXPERIMENTAL

Como se mencionó el la sección anterior, el modelado de regiones de formación estelar se realizó con la última versión del código de fotoionización Cloudy (Gunasekera, et al., 2025), El resultado producido es unidimensional y es posible seguir la evolución radial de las condiciones físicas como temperatura y densidad, así como emisividades de diferentes líneas, continuo ionizante y fracción de ionzación, entre otros parámetros y cantidades calculadas por el modelo. Aunque este código ya ha sido utilizado para modelar regiones con alto escape de fotones (Castellano, et al. 2002), en el presente trabajo extendemos el resultado unidimensional a tres dimensiones, considerando geometría esférica para la distribución radial de los diferentes valores del modelo. Un esquema del procedimiento se muestra en la Figura 4. Una vez que se tiene el modelo en tres dimensiones es posible eliminar las capas más externas de la esfera, simulando la ausencia de gas para ionizar. Tales modelos se conocen como limitados por materia, dado que existen más fotones ionizantes que gas para ionizar, es decir la materia se acaba antes que los fotones. El exceso de fotones ionizantes se considera la fracción de escape (f_{esc}).

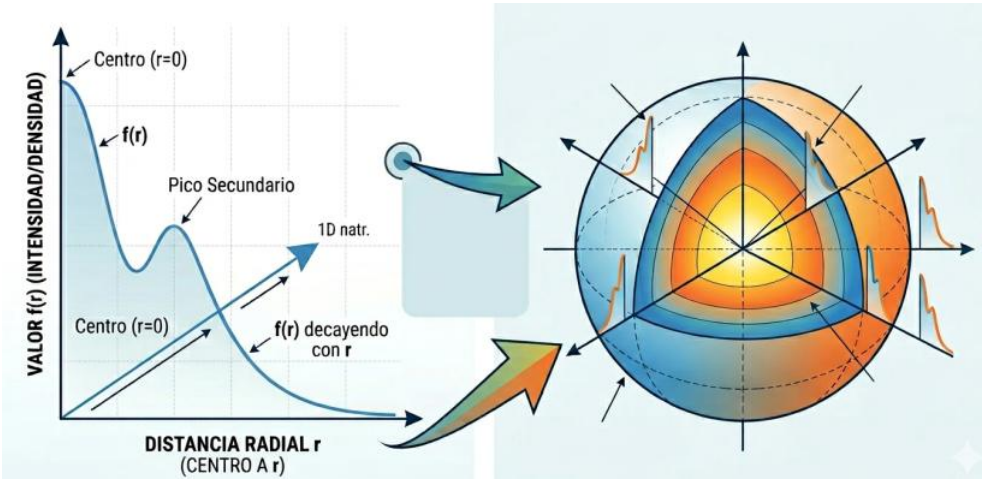


Figura 4. Representación del proceso mediante el cual las diferentes distribuciones radiales unidimensionales se extienden a una distribución tridimensional con geometría esférica.

El siguiente paso es proyectar la esfera, con las partes externas recortadas, a un plano bidimensional. De esta manera se simula una observación astronómica, donde los objetos observados, a pesar de ocupar un volumen en el espacio, solo se pueden ver proyectados sobre la bóveda celeste. Cada línea de visión sobre el objeto atravieza varios cascarones de la esfera (que son las diferentes zonas del modelo original), integrando los valores para proyectar el total sobre el plano.

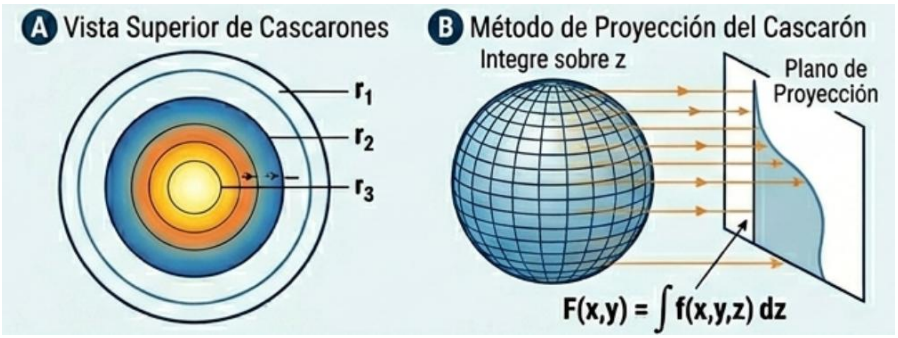


Figura 5. Proyección del modelo con distribución esférica sobre el plano, simulando la observación astronómica sobre la bóveda celeste. Cada línea de visión integra las diferentes capas que atravieza dentro de la esfera.

Los cortes de las partes externas se realizaron a diferentes niveles, de tal manera que se incrementara el escape de fotones ionizantes hasta llegar al 20%.Una vez que se tienen los modelos con diferentes valores de escape de fotones es posible estudiar el efecto en indicadores de condiciones físicas. Un método es simular una observación de rendija larga que solamente cae sobre la región central y más brillante de la nebulosa. Otra posibilidad es integrar toda la región, simulando una apertura circular de tal forma que todo el objeto cae dentro de la apertura. Dado que esta última opción es más apropiada para objetos lejanos y/o pequeños, se optó por seguir este procedimiento y son los resultados que se muestran.

Para estimar la temperatura del gas se utilizó el método directo con oxígeno, basado en la razón de la línea auroral [OIII]λ4363 a la [OIII]λ5007. Los valores integrados se dieron como entrada a la rutina getTempDem() de la librería PyNeb (Luridiane et al., 2015), en todos los casos se consideró una densidad electrónica de 100 [cm^{-3}]. Para la abundancia y la excitación se utilizó el diagrama de diagnóstico BPT (Baldwin, et al., 1981) ya que la escala horizontal [NII]λ6584/Hα es un indicador de

abundancia el cual ha sido calibrado como 12 + log(O/H) = 9.12 + 0.72 por Denicoló et al. (2002), mientras que la escala vertical es un indicador del nivel de excitación del gas (Gu, et al. 2006).

RESULTADOS

Los resultados del efecto del escape de fotones ionizantes en la determinación de la temperatura del gas se muestran en la figura 6. Se corrieron modelos con 4 abundancias diferentes, tomando como referencia la abundancia promedio de la nebulosa de Orión (abundancia HII en Cloudy) hasta llegar al doble de su valor. Todo los elementos se escalan con el mismo factor. El resultado muestra que a baja metalicidad la temperatura del gas es mayor, un comportamiento esperado dado que los metales son elementos enfriadores en las nebulosas (Balsier and Wegner, 2024). El escape de fotones produce una disminución en el diagnóstico de la temperatura, obteniendo que la región es más fría cuando tiene un escape mayor. También se observa que la variación en la temperatura tiene una dependencia con la fracción de escape, siendo mayor el cambio para altas abundancias, llegando a ser hasta de 500K para $Z = 2Z_{HII}$.

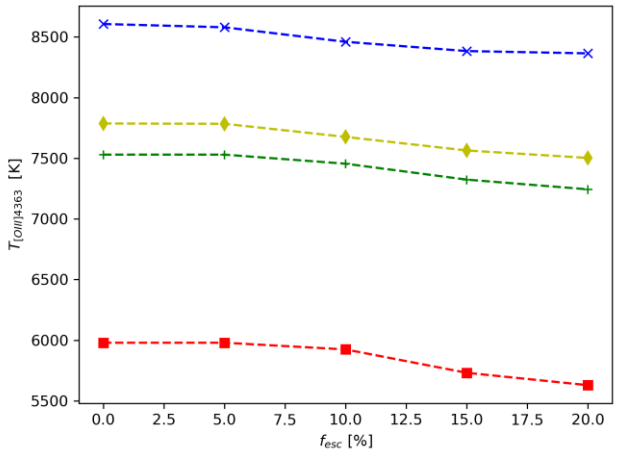


Figura 6. Efecto del escape de fotones ionizantes en la determinación de la temperatura del gas por el método directo, usando oxígeno y la línea auroral [OIII]λ4363. La línea azul (x) es para la abundancia de la nebulosa de Orión y aumenta hasta la línea roja (cuadros) que tiene el doble de abundancia.

Para el caso del lugar geométrico que ocupa la región en el diagrama de diagnóstico BPT, el resultado se muestra en la Figura 7 para los cuatro modelos con diferente abundancia y con varios porcentajes de escape de fotones ionizantes. El modelo de referencia, sin escape, se muestra a la derecha en cada línea y está marcado con la leyenda “THICK”, indicando que es ópticamente grueso. Conforme la fracción de escape aumenta la posición se desplaza a la derecha hasta llegar al punto marcado “THIN”, indicando que es opticamente delgado.

Se tiene que hay una gran variación en la escala de [NII]λ6584/Hα, que puede alcanzar más de 1.2 dex para un escape del 20% de fotones ionizantes en el caso de la abundancias más alta. Para la excitación dada por la escala vertical, se tiene que la variación es mímina, apenas de 0.1 dex para la maor abundancia y menor para bajas metalicidades. La variación en [NII]λ6584/Hα muestra una dependencia con la metalicidad, siendo mayor para altas abundancias.

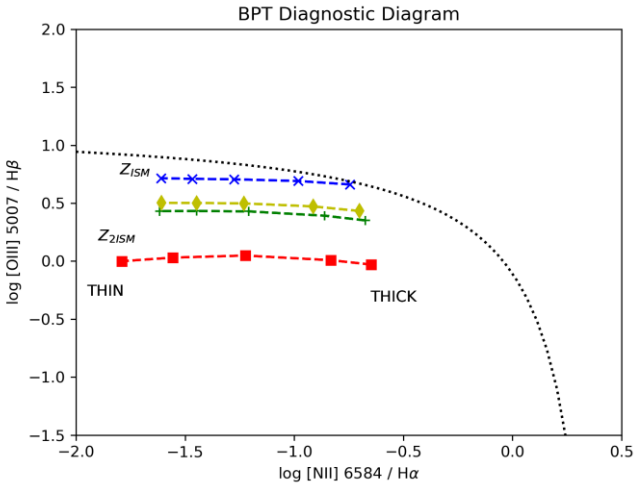


Figura 7. Efecto del escape de fotones ionzantes en el diagrama de diagnóstico BPT. La escala horizontal es un indicador de abundancia, mientras que la vertical es de excitación. Se muestran abundancias desde una hasta dos veces la del medio interestelar de la nebulosa de Orión.

La abundancia obtenida con el indicador N2 es un parámetro con gran variación. Para el caso del modelo con la mayor metalicidad, la abundancia obtenida, considerando el mayor escape de fotones, es de 12 + log(O/H) = 9.13, cuando el valor del modelo ópticamente grueso es de 9.48.

CONCLUSIONES

Como principales conclusiones del presente trabajo se tienen:

Se desarrolló una metodología para extender los modelos unidimensionales a tres dimensiones considerando geometría esférica. El modelo 3D permite modificar la estructura de la nebulosa simulada para posteriormente proyectarla al plano de la bóveda celeste, simulando una observación astronómica, permitiendo convertir el modelo 1D a un objeto extendido.

Mediante la eliminación de las zonas externas del modelo, cuando se tiene la extensión 3D, es posible simular nebulosas limitadas por materia con diferentes porcentajes de escape de fotones ionizantes. En el presente trabajo se consideró un escape de hasta el 20% de la radiación ionizante.

El valor de la excitación es poco sensible al escape de fotones, teniendo una variación de 0.1 dex aun para el modelo de mayor abundancia, el cual exhibe en general la mayor cambio.

El indicado de abundancia N2 es el que presenta la mayor variación, alcazando más de 1.2 dex en el diagrama de diagnóstico. Esto se traduce en una variación de 0.35 en la escala 12 + log(O/H), lo cual indica que se debe tener precaución al usal el indicador dado que puede dar un valor equivocado de abundancia.

La temperatura electrónica con el método directo, utilizando oxígeno muesta una variación de hasta 500 [K] para los modelos con mayor metalicidad. La variación disminuye de manera proporcional a la abundancia.

La conclusión general es la necesidad de revisar los diferentes indicadores utilizados de manera rutinaria para determinar condiciones físicas y parámetros derivados en regiones de formación estelar. Los indicadores deben considerar la existencia de una fracción de escape y cómo compensarla.

BIBLIOGRAFÍA

1. L. D. Anderson, T. M. Bania, J. M. Jackson, D. P. Clemens, M. Heyer, R. Simon, R. Y. Shah, and J. M. Rathborne, “The molecular properties of Galactic HII regions”, 2009, ApJS, 181, 255.
2. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, R. Terlevich, “Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects”, 1981, PASP, 93, 5
3. D. S. Balser, T. V. Wenger, “The Metallicity-Electron Temperature Relationship in HII Regions”, 2024, ApJ, 964, 47
4. M. Castellanos, A. I. Díaz, G. Tenorio Tagle, “On the large escape of ionizing radiation rom giant extragalatic HII regions”, 2002, ApJ., 565:L79-L82
5. G. Denicoló, R. Terlevich, E. Terlevich, “New light on the search for low metallicity galaxies – I. The N2 calibrator”, 2002, MNRAS, 330, 1.
6. Q. Gu, J. Melnick, R. Cid Fernandes, D. Kunth, E. Terlevich, R. Terlevich, “Emission-line properties of Seyfert 2 nuclei”, 2006, MNRAS, 366,2
7. C. M. Gunasekera, P. A. M. van Hoof, M. Dehghanian, P. Chakraborty, G. Shaw, S. Bianchi, M. Chatzikos, M. Tsujimoto, G. J. Ferland, “The 2025 Release of Cloudy”, 2025, RmxAA, 61c, 120.
8. V. Luridiana, C. Morisset, R. A. Shaw, “PyNeb: a new tool for analyzing emission lines. I. Code description and validation of results”, 2015, A&A, 573, A42
9. E. W. Pellegrini, M. S. Oey, P. F. Winkler,S. D. Points3 , R. C. Smith , A. E. Jaskot , and J. Zastrow, “Theoptical depth of HII regions in the Magellanic Clouds”, 2012,APJ, 755:40
10. Smith, R. C., & MCELS Team, “The UM/CTIO Magellanic Cloud emission line survey” 1998, PASA, 15, 163
11. Strömgren, Bengt, "The Physical State of Interstellar Hydrogen". 1939, The Astrophysical Journal. pp.526–547.

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL ROBUSTA MEDIANTE FUSIÓN DE GEOMETRÍA ESTÉREO Y SEÑALES POLARIMÉTRICAS

Gabriel Castillo-Estrada, Emilio Z. Leyva-Levya, David I. Serrano-García, Joel Cervantes-L, Sandra Eloísa Balderas Mata, Geliztle A. Parra-Escamilla.

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara.
jose.castillo7321@alumnos.udg.mx

RESUMEN

En visión por computadora, la técnica de estereovisión permite calcular de manera fiable las dimensiones reales de un objeto con un sistema de dos cámaras debidamente calibrado, sin embargo, recupera pobremente los detalles finos de la superficie de los objetos y no presenta un buen desempeño en materiales con poca textura; en contraste, las técnicas de recuperación de orientación de superficie basadas en polarización de la luz proporcionan información detallada de la normal de superficie sin que esto dependa de la textura del material e incluso en materiales reflejantes o transparentes, sin embargo, la dirección del vector normal que se obtiene es ambigua por lo que requiere información geométrica adicional para ser útil. Debido a estas características, ambas técnicas proporcionan información que puede ser complementaria, por ello, en este trabajo se propone una metodología que fusiona geometría estéreo y señales polarimétricas para estimar los vectores normales de la superficie de un objeto de manera precisa.

Palabras Clave: Reconstrucción tridimensional, Polarización de la luz, Estereovisión, Surface-from-polarization.

INTRODUCCIÓN

En el área de metrología óptica se han desarrollado una serie de técnicas destinadas a obtener información tridimensional de un objeto a partir de imágenes de este, a esto se le llama reconstrucción tridimensional. La estereovisión es una de estas técnicas de reconstrucción y esta inspirada en el funcionamiento de la visión binocular que permite a los humanos estimar la profundidad, esta técnica permite estimar las dimensiones reales de un objeto empleando dos cámaras como sistema estéreo calibrado. Su precisión depende de la textura superficial y del contraste fotométrico, además de que no suele capturar los detalles de alta frecuencia o finos en la superficie de los objetos que mide.

Por otro lado, debido a que el estado de polarización lineal de la luz esta relacionado directamente con la geometría de la superficie de los objetos, a partir del análisis de señales polarimétricas, como grado y ángulo de polarización lineal, es posible calcular la dirección de vectores normales a una superficie de un objeto, usando una cámara sensible al estado de polarización. Lamentablemente, la dirección que se estima para el vector normal es ambigua, dado que proporciona dos direcciones en lugar de una única, y requiere una señal adicional para seleccionar la dirección correcta de ambas, además de que no puede estimar la ubicación (relativa o absoluta) ni las dimensiones de un objeto. Sin embargo, es importante mencionar que, a diferencia de estereovisión, esta técnica no depende de la textura sobre la superficie del objeto para obtener información, por lo que funciona aún en objetos con apariencia uniforme. Debido a estas características, ambas técnicas pueden proporcionar información complementaria, que, en conjunto, permita estimar de manera precisa la orientación de los vectores normales a la superficie de un objeto.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Estereovisión estima profundidad, Z, a partir de dos imágenes tomadas usando un par de cámaras en posiciones diferentes, de manera que una se encuentra desplazada lateralmente con respecto a la otra [1]. Emplea como base la correspondencia entre dos pixeles, uno en la imagen izquierda y otro en la derecha, que representan el mismo punto tridimensional entre las imágenes de un sistema de dos cámaras. Esta diferencia de posición es conocida como disparidad, d, y esta relacionada de forma inversa con la profundidad a la que se encuentra el punto tridimensionalmente, esto se expresa en la Ec. 1. La disparidad se calcula de manera que una de las cámaras es la referencia, por lo que la profundidad calculada se encuentra en el sistema de dicha cámara, es decir, como si fuera una imagen de la escena tomada desde su perspectiva. Para relacionar el cálculo de la disparidad con las dimensiones reales de un objeto se requiere un proceso de calibración con un patrón de dimensiones conocidas, esto determina una matriz de parámetros intrínsecos con la distancia focal f, el tamaño de píxel, y una matriz de parámetros extrínsecos con la distancia B entre ambas cámaras, asociados al par de cámaras. Si bien existen una gran cantidad de algoritmos diseñados para resolver el problema de la correspondencia y calcular la disparidad, para este trabajo hemos utilizado el algoritmo Semi-Global Matching propuesto por Hirschmuller [2], debido a que produce mapas de disparidad densos.

$$\boldsymbol{Z = \frac{fB}{d}} \qquad \textbf{(1)}$$

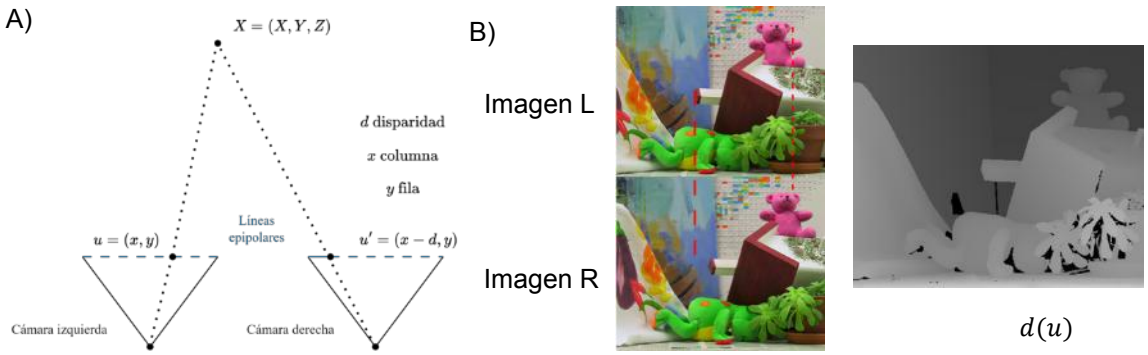
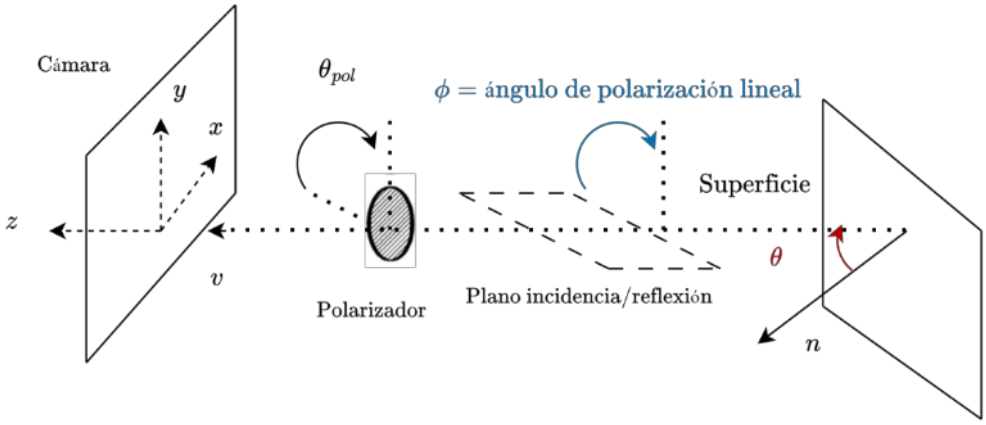


Figura 1. A) Sistema estéreo, B) el sistema calibrado y rectificado toma un píxel u en la imagen L y busca una correspondencia, es decir, un píxel u' en la misma fila, pero en diferente columna x en la imagen R, ambos pixeles representan el mismo punto tridimensional. Este proceso se lleva a cabo para todos los pixeles en la imagen, dando como resultado el mapa de disparidad $d(u)$, posteriormente se obtiene el mapa $Z(x, y)$ aplicando la Ec. 1. Las imágenes L, R y el mapa de disparidad pertenecen a Middlebury [2].

Debido a que las señales polarimétricas proporcionan información que se encuentra en el dominio de los vectores normales de superficie, es necesario transformar el mapa de profundidad por píxel en un mapa de normales por píxel. Como la profundidad es una función $Z(x, y)$ (para una imagen de y filas y x columnas) la interpretamos como una superficie de la cual sus vectores normales se obtienen como se muestra en la Ec. 2, a partir de dos vectores tangentes a la misma; en la práctica estos vectores se obtienen con versiones discretas de la derivada conocidas como matrices de diferencias finitas. Es importante mencionar que el mapa de normales obtenido por este método generalmente es ruidoso, contendrá poca información de alta frecuencia que sea útil y tendra píxeles sin información, gracias a que la superficie obtenida de estéreo no es suave, debido a lo díficil que puede resultar resolver el problema de la correspondencia para todos los píxeles y por tanto obtener un mapa de profundidad completamente denso que preserve la continuidad y la suavidad de la superficie del objeto a reconstruir.

$$\boldsymbol{n(u) = \left(\vec{\imath} + \frac{\partial Z}{\partial x}\vec{k}\right) \times \left(\vec{\jmath} + \frac{\partial Z}{\partial y}\vec{k}\right)} \quad \textbf{(2)}$$



Para estimar la dirección de la normal de superficie a partir del estado de polarización lineal, se mide el grado ρ_d y el ángulo ϕ de polarización por píxel, esto se consigue rotando un polarizador o en su defecto con una cámara con arreglo de micropolarizadores. La relación entre estas mediciones y la normal de superficie se deriva de los coeficientes de Fresnel para la reflexión y transmisión de un haz incidente, este modelo hace distinción entre polarización lineal difusa o especular, siendo la primera paralela al plano de incidencia y la segunda perpendicular. Las Ecs. 3 y 4 permiten calcular la orientación de la normal de superficie en coordenadas esféricas locales cuando el material induce polarización difusa. Finalmente, siempre se obtienen dos mapas de normales debido a que α tiene dos direcciones posibles con diferencias de $\pm 180°$[4], como indica la Ec. 4.

Figura 2. Diagrama del método para recuperar la orientación de superficie a partir de señales polarimétricas. Note que el grado de polarización lineal depende del ángulo θ que se forma con la dirección de vista; por su parte, el ángulo de polarización lineal es paralelo al plano de incidencia/reflexión, por lo que indica el ángulo rotación ϕ en torno a la dirección de vista.

$$\boldsymbol{\cos\theta(u) = \sqrt{\frac{\eta^4(1-\rho_d^2) + 2\eta^2(2\rho_d^2 + \rho_d - 1) + \rho_d^2 + 2\rho_d - 4\eta^3\rho_d\sqrt{1-\rho_d^2} + 1}{(\rho_d + 1)^2(\eta^4 + 1) + 2\eta^2(3\rho_d^2 + 2\rho_d - 1)}}} \quad \textbf{(3)}$$

$$\boldsymbol{\alpha(u) = \phi(u) \text{ ó } \phi(u) + \pi} \quad \textbf{(4)}$$

Seleccionar la dirección adecuada de la normal de superficie para todos los pixeles es un problema de optimización. Esencialmente se debe escoger la dirección de las dos posibles por píxel, esto se representa con dos etiquetas posibles por píxel L_1 o L_2. Para cuantificar porcentajes de similitud en las configuraciones de pixeles y etiquetas a la solución óptima, se emplea la función de energía de la Ec. 5, de manera que, al minimizarla para todos los pixeles, la configuración final de etiquetas o valores por píxel resulta en un mapa de normales de superficie óptimo.

$$\boldsymbol{E\big(n(u)\big) = \sigma_0 \sum \phi\big(\hat{n}(u)\big) + \sigma_1 \sum \xi\big(L(u), L(v)\big) + \sigma_2 \sum \Psi\big(n(u), n(v), n(w)\big)} \quad \textbf{(5)}$$

En esta función de energía, el término ϕ emplea la distancia al producto punto, es decir $1 - C_{1,2}$, dónde $C_{1,2}$ es el producto punto entre cada normal de polarización o $n_{1,2} \cdot \hat{n}(u)$, de esta forma codifica

que tanto se parecen las dos normales posibles a la de estéreo. El término ξ es un termino *pairwise* que emplea la diferencia absoluta entre las etiquetas de pixeles vecinos y un peso w_{ij} que contiene información sobre el gradiente de la superficie estéreo, este último también es escalar y constante. Finalmente, el término Ψ emplea los gradientes por píxel $p(u)$ y $q(u)$ de manera que se imponga una energía mayor a un rotacional diferente de 0 en una combinación de 3 pixeles, esto es $|p(u) - p(w) - (q(v) - q(u))|$.

Para minimizar esta función de energía para todos los píxeles es necesario modelar el problema como un Campo Aleatorio de Markov o MRF [1][5]. Si una imagen se modela de esa forma, se entiende que cada píxel es una variable aleatoria conectada a sus vecinos del conjunto mediante interdependencias, estas últimas definen la probabilidad de que cada pixel o variable tome un valor de entre un conjunto de posibles. Al aplicar este concepto a problemas de optimización, las interdependencias se describen mediante la función de energía, que debe penalizar la probabilidad de que los pixeles tomen valores que alejan al problema de la solución global. Si bien, no existe un método general o único para solucionar un problema modelado como MRF, si la función de energía es convexa, es decir, que no contiene mínimos locales, el problema se simplifica y se pueden emplear algoritmos generales de optimización convexa como los que se incluyen con la librería CVXPY [6]. En la figura 3 se muestra un ejemplo de cómo funciona la optimización convexa para una imagen.

Dado que deseamos realizar la optimización global de la función de energía descrita en la Ec. 4 como un problema convexo, será necesario evaluar los términos y el dominio del problema para demostrar que estos son efectivamente convexos [7].

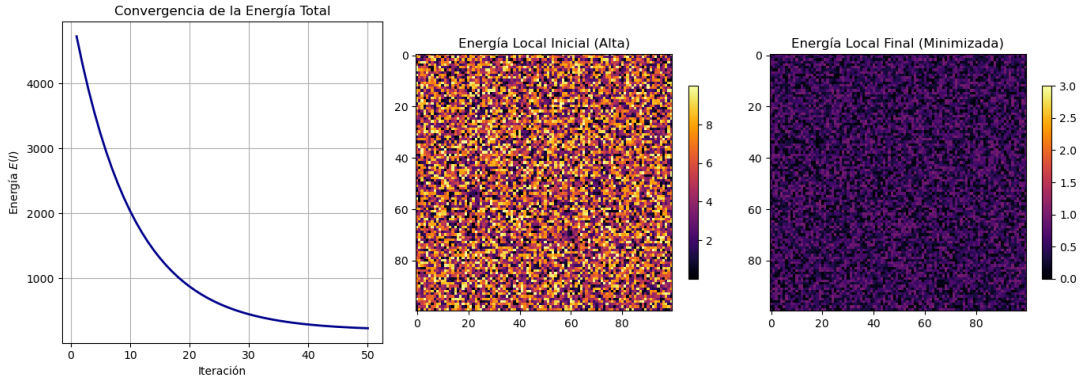


Figura 3. La optimización convexa de MRF se representa con un mapa de energía o calor. Cómo se puede notar, el estado inicial del problema es subóptimo, pero al aplicar un algoritmo de optimización se llega a un estado de energía global mínimo. Nota: El segundo mapa tiene un rango distinto para mejorar la visualización de los cambios pequeños.

En principio vamos a formular el problema de manera que dependa de una variable continua $x \in [0,1]$, y por tanto $L_1(u)$ cuando $x < 0.5$ y $L_2(u)$ en caso contrario. Para demostrar que este dominio D es convexo, se aplican las reglas de los conjuntos de este tipo. Partiendo de dos vectores cualesquiera $x, y \in D$ y un valor escalar $\theta \in [0,1]$. La definición dice que el conjunto es convexo si $z = \theta x + (1-\theta)y$ también está en D. Evaluando para un píxel i cualquiera $z_i = \theta x_i + (1-\theta)y_i$, dado que x, y pertenecen al dominio deben ser mayores o iguales que 0, de la misma forma que θ, esto nos conduce a que $z_i \geq 0$. A su vez, dado que x, y pertenecen a D, deben ser menores o iguales que 1, así como θ, lo que nos conduce a que $z_i \leq \theta + 1 - \theta \leq 1$. Esta última condición nos muestra que $z_i \in D$.

El primer término de la función de energía, que consiste en la función $\phi = x_i C_{2,i} + (1 - x_i)C_{1,i}$, es esencialmente una función afín (una línea recta sobre x) dado que los costos son constantes. Todas las funciones afines son trivialmente convexas, por lo que este término es convexo.

El segundo término, o entre pares, consiste en $\xi = w_{ij}|x_i - x_j|$, donde el peso w_{ij} depende del gradiente entre dos pixeles vecinos en el mapa de normales obtenido de estéreo. Debido a que el valor absoluto de una resta lineal también es una función afín, y el término w_{ij} es constante, el segundo término también es convexo.

Respecto al último término o, $\Psi = |p(u) - p(w) - (q(v) - q(u))|$, hay que considerar que los gradientes por píxel, al ser discretos, se puede expresar como $p_i(x_i) = p_{o,i} + \Delta p_i x_i$ y $q_i(x_i) = q_{0,i} + \Delta q_i x_i$, es decir, a partir de las razones de cambio discretas. Estas son funciones lineales, que al sustituirlas en la expresión completa de Ψ resultan en una combinación lineal $Ax_u + Bx_v + Cx_w + D$ donde $A, B, C\ y\ D$ son constantes reales. Dicha combinación lineal es una transformación afín de la forma $A^T x + B$, y el valor absoluto de una transformación afín es convexa, por lo que el último término también es convexo. De esta forma, se concluye que todo el problema es convexo y, por tanto, al aplicar optimización convexa se debe llegar al único resultado óptimo.

METODOLOGÍA

El *setup* experimental consiste en dos cámaras dispuestas como un sistema estéreo. En nuestro caso una de las cámaras es CMOS con un sensor RGB Sony IMX477 con una resolución nativa de 4056 × 3040 pixeles, emparejado con un lente de 16 mm; esta cámara es operada desde una Raspberry Pi empleando un módulo Arducam. La segunda es una cámara MONO Thorlabs Kiralux CS505MUP con arreglo de micro polarizadores, que posee una resolución de 2448 x 2048 sensible al estado de la polarización lineal de la luz, la cual permite operar en intensidad MONO tradicional con la resolución completa, o midiendo la intensidad para cada orientación de micro polarizador (45,90,135,0 grados) con ¼ de dicha resolución (1224 x 1024). Se realizó la calibración de ambas cámaras en conjunto tomando imágenes de un patrón tipo tablero de 24mm por cuadro. Para preservar las señales polarimétricas, se empleó como resolución base del sistema la de 1224 x 1024 evitando realizar interpolación entre píxeles que podrían distorsionar la medición del ángulo y grado de polarización lineal.

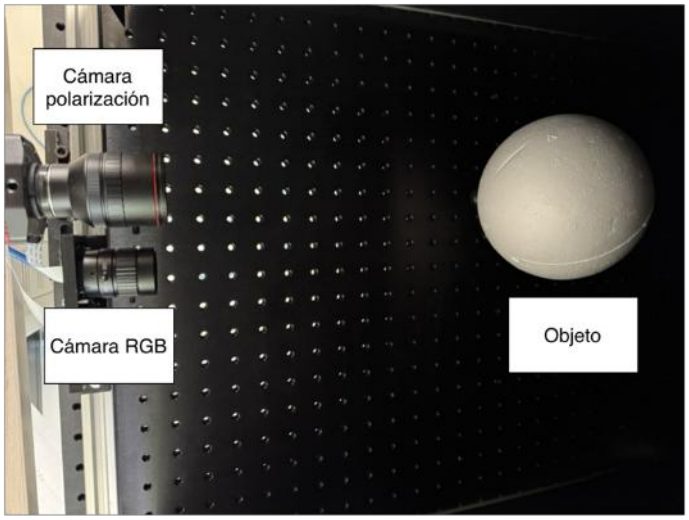


Figura 3. Arreglo experimental. Las cámaras están dispuestas como un par estéreo, sin embargo, la cámara de polarización toma imágenes de forma individual para obtener la información polarimétrica.

El método propuesto se describe en el diagrama de la figura 4 donde se muestra la simulación del método. Comienza estimando un mapa de profundidad a través de estereovisión, de este mapa se calculan las normales de superficie; a la par, empleando las imágenes de polarización se deben calcular las dos orientaciones posibles para las normales de superficie por píxel; finalmente, se

emplean las normales de superficie del mapa de profundidad como guía para seleccionar la normal óptima por píxel empleando el algoritmo de optimización convexa.

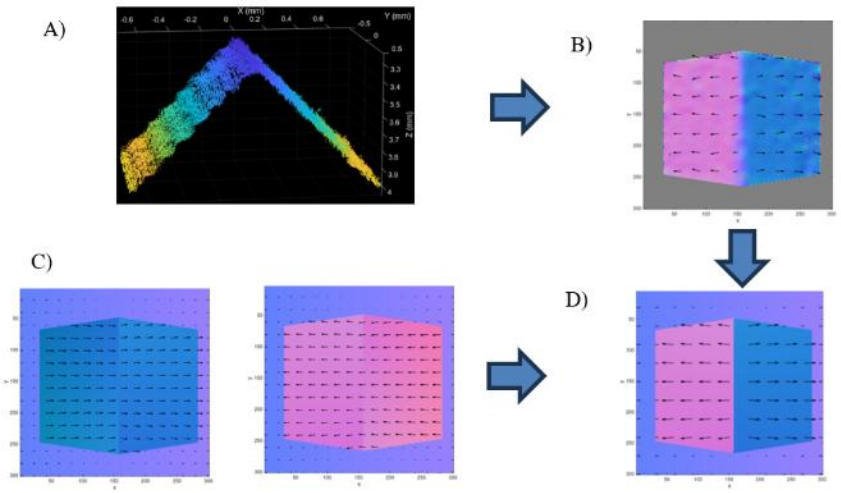


Figura 4. Descripción del método para obtener un mapa de normales de superficie con la dirección correcta. A) muestra la nube de puntos obtenida a través de estereovisión. B) muestra el mapa de las normales de superficie calculadas empleando la Ec. 2. C) A continuación, empleando las Ec. 3 y 4 se calculan las dos normales posibles por píxel. Y finalmente, empleando el método de optimización para la Ec.5 se obtiene la dirección óptima de la normal de superficie para cada píxel como se muestra en D).

RESULTADOS

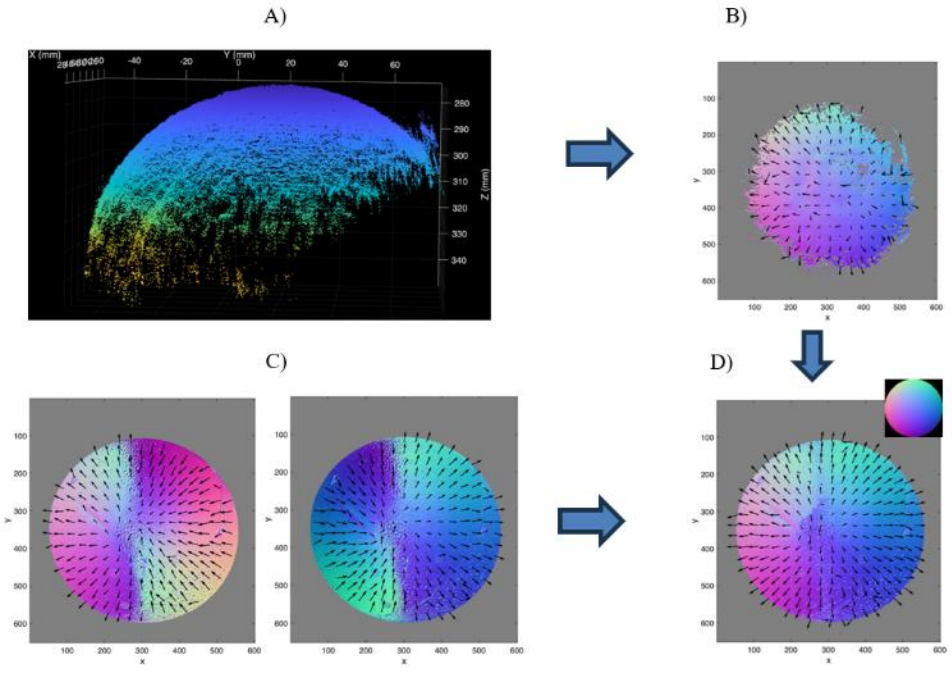


Figura 5 muestra los resultados experimentales obtenidos con nuestro sistema. Fig 5a) muestra la nube de puntos obtenida con estereo vision, b) las normales de superifice, c) las normales de superficie con la informacion de polarizacion mostrando ambos posibles casos y d) el resultado de la combinacion de amba informacion. estereoscópica, así como imágenes de su estado de

polarización lineal utilizando exclusivamente la cámara sensible a la polarización. El material tiene un índice de refracción $\eta \approx 1.57$ y el tipo de polarización lineal que induce es principalmente difuso.
Figura 5. Proceso para la recuperación de las normales de superficie en un objeto real siguiendo el método propuesto. En A) se encuentra la nube de puntos obtenida con estereovisión y sus normales correspondientes en B). El mapa de normales de superficie final en D) es una combinación de los dos mapas posibles de C). Se incluye la esquina superior derecha una referencia de como se distribuyen las normales de superficie sobre una esfera perfecta.

CONCLUSIONES

En el mapa de normales con la dirección óptima se observa que el método de optimización funciona a pesar de que tenemos datos faltantes en el mapa de normales calculadas a partir de estéreo, este comportamiento es posible gracias a los términos de suavidad e integralidad que de alguna manera propagan el comportamiento de los vecinos cuando el término unario no funciona como guía. También se observa que la dirección de las normales corresponde con lo esperado para un objeto con forma de esfera, además de que retiene los detalles de alta frecuencia existentes en las imágenes originales de polarización. En el futuro planeamos emplear este mapa para refinar la estimación de profundidad original y obtener un mejor resultado en una reconstrucción tridimensional completa.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. Hartley and A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
2. H. Hirschmuller, "Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 30, no. 2, pp. 328-341, Feb. 2008, doi: 10.1109/TPAMI.2007.1166.
3. D. Scharstein and R. Szeliski,"High-accuracy stereo depth maps using structured light," in IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2003), vol. 1, pp. 195-202, Madison, WI, Jun. 2003.
4. G. A. Atkinson and E. R. Hancock, "Recovery of surface orientation from diffuse polarization," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 15, no. 6, pp. 1653-1664, Jun. 2006. doi: 10.1109/TIP.2006.871114.
5. D. Zhu and W. A. P. Smith, "Depth from a Polarisation + RGB Stereo Pair," 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019, pp. 7578-7587, doi: 10.1109/CVPR.2019.00777.
6. S. Diamond and S. Boyd, "CVXPY: a python modeled embedded modelling language for convex optimization", J. Mach. Learn. Res., 2016, pp. 2909–2913.
7. S. Boyd and L. Vandenberghe, Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

MONITOREO DE EFICIENCIA DE PLACAS CON GRAFENO OXIDADO PARA PRUEBAS DE PROTEÍNAS CLÍNICAMENTE RELEVANTES

Martha Ulloa Ramírez[1] y Eden Morales Narváez[2]

[1]Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, [2]Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, Universidad Nacional Autónoma de México.
martha.ulloa6947@alumnos.udg.mx

RESUMEN

La creciente necesidad de métodos de diagnóstico más accesibles, sensibles y oportunos para enfermedades infecciosas ha impulsado el desarrollo de plataformas de biosensado basadas en nanomateriales [1]. En este contexto, el presente trabajo evaluó la eficiencia de apagamiento de fluorescencia de superficies decoradas con óxido de grafeno (GO) [2] en placas de micropocillos, con la finalidad de determinar su estabilidad temporal y su viabilidad tecnológica para aplicaciones de biodetección. El objetivo central fue analizar el comportamiento del GO como transductor óptico durante 31 días en un sistema de detección de proteínas.

La metodología se estructuró mediante la preparación y estandarización de reactivos y superficies: dilución de GO hasta una concentración de trabajo de 1600µg/mL, preparación de PBS (*Phosphate Buffered Saline*, o solución salina amortiguadora de fosfatos) y ajuste de la sonda anti-IgG-FITC hasta 0.25µg/mL. Posteriormente, se acondicionaron micropocillos control y micropocillos recubiertos con GO; el recubrimiento se realizó con agitación constante a 690 rpm durante 12 horas, seguido de lavados y secado. La caracterización se efectuó mediante lecturas cinéticas de fluorescencia cada 5 minutos durante 120 minutos por corrida, con evaluación longitudinal de cinco placas del día 1 al día 31, lo que permitió comparar la estabilidad del apagamiento entre condiciones con y sin GO.

Los resultados evidenciaron un desempeño estable y reproducible del sistema con GO. La extinción de fluorescencia se mantuvo entre 50% y 60% durante el periodo del día 1 al día 31. Además, se observaron valores de referencia de aproximadamente 60% en el día 1 y 65% en el día 10, lo cual respalda la repetibilidad experimental. En contraste, el decaimiento natural de fluorescencia en la condición control permaneció por debajo de 20 %. Asimismo, la condición con GO mostró mayor eficiencia de extinción y estabilidad cinética, con un promedio de 0.454 ± 0.044, frente a 0.877 ± 0.044 en pocillos sin grafeno.

En conclusión, la plataforma basada en GO presentó estabilidad funcional durante 31 días, con ventajas relevantes como detección en tiempo real, potencial de multiplexación de analitos en matrices reales y una base técnica sólida para su futura transferencia y comercialización en esquemas de diagnóstico más rápidos y de menor costo [3].

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de enfermedades virales en la población mundial ha sido una de las problemáticas más relevantes en los últimos años debido a su contagio masivo. Una de las formas más comunes de realizar las pruebas de detección es el uso de inmunoensayos; sin embargo, algunos de estos ensayos carecen de especificidad, ya que pueden generar falsos positivos y sus resultados pueden tardar varias horas, además de requerir procedimientos engorrosos que los vuelven de difícil acceso masivo [1].

En este contexto, los nanobiosensores ópticos representan una alternativa prometedora. Estos son dispositivos capaces de detectar agentes biológicos en tiempo real con alta sensibilidad y especificidad. El óxido de grafeno (GO) se posiciona como transductor ideal por su capacidad de

apagamiento de fluorescencia mediante el fenómeno FRET (Transferencia de Energía por Resonancia de Förster). El grupo del Dr. Eden Morales Narváez desarrolló una plataforma de biosensado basada en micropocillos modificados con GO para la detección en tiempo real de proteínas clínicamente relevantes, incluyendo anticuerpos generados por COVID-19 (solicitud de patente MX/a/2019/010242) [2, 3] (Figura 1).

A diferencia de técnicas como la Resonancia de Plasmones de Superficie (SPR) y los inmunoensayos convencionales, esta plataforma ofrece detección en tiempo real y menor costo de producción. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la estabilidad temporal de la eficiencia de apagamiento de fluorescencia del GO adherido a placas de micropocillos durante un periodo de 31 días, con el objetivo de validar su alta repetibilidad y potencial de comercialización.

Funcionamiento de la plataforma de biosensado

La plataforma opera integrando tres elementos: una placa de micropocillos de poliestireno funcionalizada con óxido de grafeno (GO) como superficie transductora, una sonda fluorescente Anti-IgG-FITC como elemento de biorreconocimiento, y un espectrofotómetro para la lectura de la señal. El proceso inicia cuando la sonda se deposita sobre los pocillos que en ausencia del analito (IgG humana), la sonda queda adsorbida en la proximidad del GO y su fluorescencia es extinguida mediante el fenómeno FRET. En presencia del analito, la sonda se une específicamente a la IgG y no tiene afinidad por la superficie de GO, ofreciendo una alta emisión fluorescente. De este modo, la señal detectada es directamente proporcional a la concentración del analito en la muestra [3, 9].

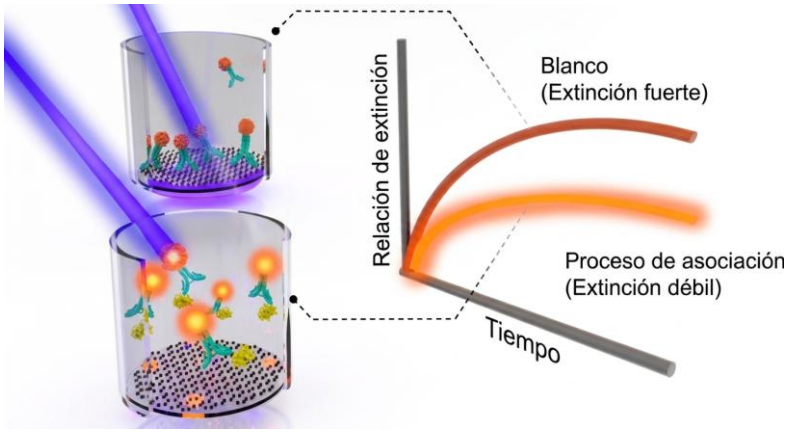


Figura 1. Plataforma de biosensado basada en micropocillos con óxido de grafeno. En ausencia del analito (blanco), el GO extingue fuertemente la fluorescencia de las sondas Anti-IgG–FITC. En presencia del analito, las sondas se unen a su objetivo y la señal fluorescente se conserva (proceso de asociación). Adaptado de [3], Copyright © 2022 Los autores. Publicado por la Sociedad Química Estadounidense. Dicha publicación está bajo la licencia CC-BY 4.0.

El papel del GO como transductor óptico

El GO es una lámina bidimensional de grafeno funcionalizada con grupos hidroxilo, epóxido y carboxilo que le confieren hidrofilicidad y biocompatibilidad. Gracias a estos grupos de oxígeno, el GO genera un entorno rico en electrones capaz de aceptar energía desde el estado excitado de un fluoróforo cercano, extinguiendo su emisión. Este proceso ocurre por Transferencia de Energía por Resonancia de Förster (FRET) en donde el fluoróforo excitado (donante) transfiere energía al GO (aceptor) a través de acoplamiento dipolo - dipolo, sin emisión de fotones, siendo eficiente hasta distancias de 30 nm [6, 8]. Esto convierte al GO en un apagador de amplio alcance, capaz de extinguir cualquier fluoróforo que se encuentre adsorbido sobre su superficie, y en un transductor ideal para este tipo de inmunoensayo.

Sonda fluorescente: Anti-IgG-FITC

La sonda empleada en el sistema es el anticuerpo Anti-IgG humana conjugado con isotiocianato de fluoresceína (FITC). El FITC absorbe energía a 495 nm y emite fotones a 521 nm, permitiendo su detección espectrofotométrica. Cuando la sonda está libre (no unida a su analito), queda disponible para adsorberse sobre el GO y ser apagada. En cambio, al unirse a la IgG humana (el analito diana, un anticuerpo abundante en sangre y fluidos biológicos con función protectora frente a infecciones) la sonda adopta una conformación que la aleja de la superficie del GO y conserva su fluorescencia [5, 7]. La relación cuantitativa entre señal fluorescente recuperada y concentración de analito es la base del biosensado.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Preparación de muestras. Los reactivos empleados fueron placas negras de 96 micropocillos para cultivo celular con tapa y fondo de poliestireno marca Corning (Costar, catálogo 3603), cuya superficie presenta una carga neta negativa debida a grupos funcionales que contienen oxígeno, lo que favorece interacciones hidrofílicas y puentes de hidrógeno con el GO. La sonda fluorescente empleada fue Anti-IgG-FITC (abcam, Cambridge, Reino Unido) con una relación F/P de 5 y concentración de fábrica de 1 mg mL^{-1}. El analito de referencia fue IgG humana purificada con pureza ≥ 95 %. **Preparación de superficies con óxido de grafeno.** El GO se diluyó en agua ultrapura hasta una concentración de trabajo de 1600 µg mL^{-1}. Se depositaron 100 µL de esta solución por pocillo en la mitad de la placa (columnas 7 - 12, filas A - H), la cual se mantuvo bajo agitación constante a 690 rpm durante 12 horas para asegurar una adhesión eficiente a la superficie de poliestireno. Posteriormente, se realizaron tres lavados con 100 µL de agua ultrapura para eliminar el excedente de GO no adherido. La otra mitad de la placa (columnas 1 - 6) se mantuvo sin GO como condición control. **Preparación de la sonda Anti-IgG-FITC**. Se realizó una primera dilución de 1 µL del anticuerpo Anti-IgG-FITC en 999 µL de PBS (solución amortiguadora de fosfatos preparada disolviendo una tableta en 200 mL de agua ultrapura). A continuación, se hizo una segunda dilución tomando 250 µL de la dilución anterior y mezclándolos con 750 µL de PBS, obteniendo una concentración final de trabajo ya en el pocillo de 0.125 µg mL^{-1}.

Caracterización cinética y longitudinal. La intensidad de fluorescencia se midió mediante lectura espectrofotométrica cada 5 minutos durante 120 minutos por corrida, tanto en los pocillos con GO como en los controles. Esta caracterización se llevó a cabo de manera longitudinal durante 31 días, evaluando un total de cinco placas fabricadas de manera independiente bajo las mismas condiciones estandarizadas. El porcentaje de apagamiento se calculó a partir de la relación entre la intensidad de fluorescencia normalizada en pocillos con GO respecto a los controles sin GO.

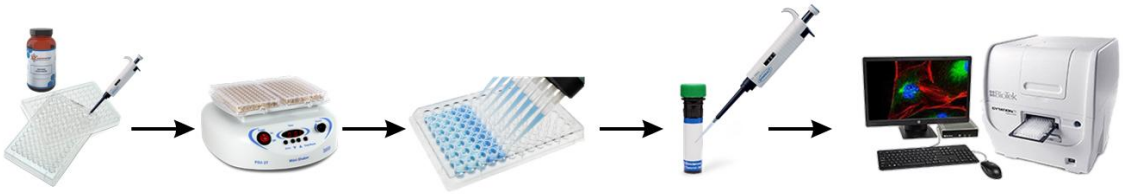


Figura 2. Diagrama del procedimiento experimental. De izquierda a derecha: recubrimiento de la placa de micropocillos con óxido de grafeno, incubación bajo agitación constante, lavados de la superficie, adición de la sonda Anti-IgG-FITC y lectura espectrofotométrica de la fluorescencia. Figura de elaboración propia. Imágenes ilustrativas de equipos y materiales obtenidas de: micropipeta de volumen fijo (Reactlab, reactlab.com.ec); agitador de microplacas Grant Instruments PMS-1000i (Gem Scientific, gemscientific.co.uk); placa de 96 pocillos CELLTREAT 229190 (celltreat.com); tubo de proteína (Labclinics, labclinics.com); y lector multimodal BioTek (Silveracei, silveracei.com.mx).

RESULTADOS

Las cinco placas modificadas con GO fueron evaluadas longitudinalmente del día 1 al día 31. En todos los casos, el sistema presentó un desempeño estable y reproducible. La extinción de fluorescencia se mantuvo entre 50% y 60% durante todo el periodo de evaluación en todas las réplicas (Figura 3).

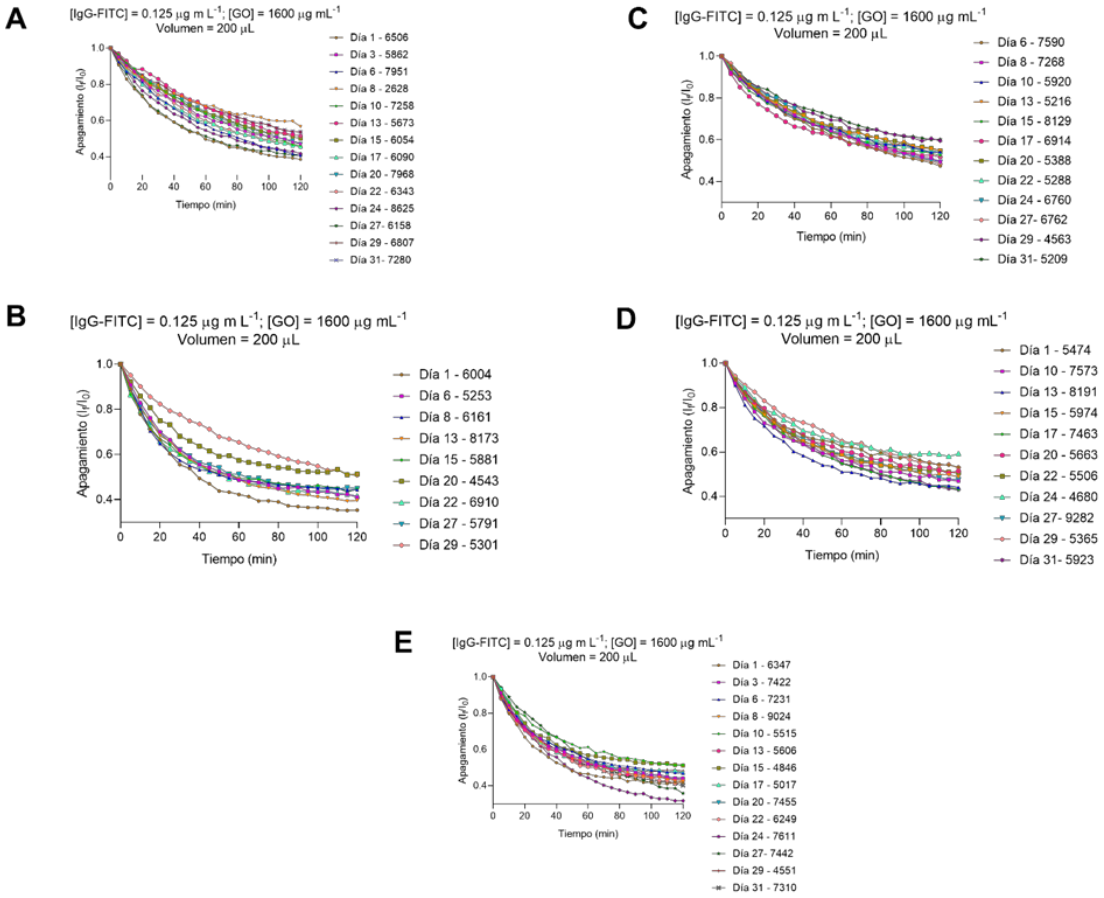


Figura 3. Los resultados de cada una de las cinco placas que se realizaron durante toda la investigación bajo las mismas condiciones y con base a una experimentación de 31 días aproximadamente. **A)** Representa el gráfico de las evaluaciones de la primera placa durante un mes. **B)** Gráfica de las evaluaciones de la segunda placa. **C)** Gráfica de las evaluaciones de la tercera placa. **D)** Gráfica de las evaluaciones de la cuarta placa. **E)** Gráfica de las evaluaciones de la quinta placa. Adaptado de [3], Copyright © 2022 Los autores. Publicado por la Sociedad Química Estadounidense. Dicha publicación está bajo la licencia CC-BY 4.0.

Analizando individualmente cada placa: la primera placa mostró un máximo de apagamiento del 70 % en el día 10 y un mínimo del 43.2 % en el día 8 (valor atribuido a error experimental en la preparación), con rangos del 56 % al 69 % en los demás días. La segunda placa presentó su máximo apagamiento en el día 24 con aproximadamente 64 %, y su menor valor en el día 31 con 46 %, mostrando resultados consistentes durante el mes. La tercera placa alcanzó su máximo apagamiento en los días 6 y 13 con 58 – 59 %, manteniéndose en un rango del 50 % al 55 % durante los demás días. Las placas cuarta y quinta mostraron apagamientos máximos de 60 % a 70 % hasta los últimos días de evaluación.

Los análisis comparativos entre días mostraron que el día 1 presentó aproximadamente 60 % de apagamiento en las placas 1, 3 y 5, mientras que el día 10 evidenció un promedio de 65 % en las

placas 1, 2, 4 y 5. Los días 17 y 27 confirmaron que las placas mantienen su eficiencia de apagamiento con el paso del tiempo, con valores estables entre 50 % y 60 % en promedio.

Con fines de presentación en formato de artículo científico, se trazó la media resultante de las placas 1 y 5. Los paneles de resultados muestran que el decaimiento natural de fluorescencia en la condición control (sin GO) permaneció por debajo del 20 % en todos los días evaluados, confirmando la estabilidad de la sonda fluorescente. El porcentaje de apagamiento con GO osciló entre 50 % y 65 %, con un máximo de aproximadamente 63 % en el día 24 (Figura 4).

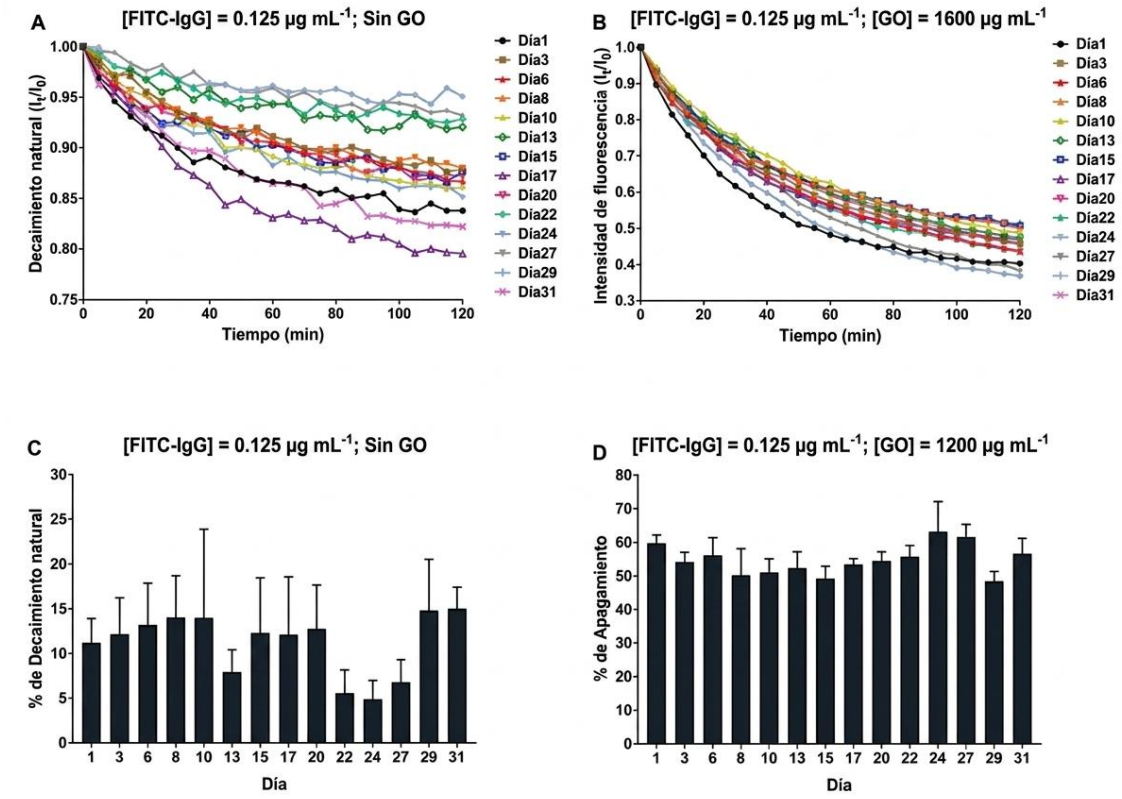


Figura 4. Desempeño cinético y longitudinal del sistema de biosensado. (A - B) Curvas cinéticas representativas (0 - 120 min) para la condición sin GO y con GO, respectivamente, evaluadas del día 1 al día 31. (C) El decaimiento natural de fluorescencia se mantuvo por debajo del 20 % en todos los días evaluados. (D) El porcentaje de apagamiento con GO osciló entre 50 % y 65 %, con un máximo de ~ 63% en el día 24, evidenciando la estabilidad funcional de la plataforma durante un mes. Adaptado de [3], Copyright © 2022 Los autores. Publicado por la Sociedad Química Estadounidense. Dicha publicación está bajo la licencia CC-BY 4.0.

Los valores promedio de intensidad normalizada fueron 0.454 ± 0.044 para pocillos con GO frente a 0.877 ± 0.044 para pocillos sin GO, confirmando la eficiencia de apagamiento y la adhesión estable del GO durante todo el periodo experimental. Estos resultados demuestran que la plataforma admite detección múltiple de analitos en matrices reales (incluyendo E. coli y anticuerpos de COVID-19), con alta repetibilidad.

CONCLUSIONES

La plataforma de biosensado basada en óxido de grafeno evaluada en el presente trabajo demostró mantener adhesión estable en placas de micropocillos de poliestireno durante al menos 31 días continuos. La extinción de fluorescencia fue consistente entre el 50 % y 60 %, con decaimiento

natural inferior al 20 % en la condición control, validando la integridad de la sonda fluorescente a lo largo del tiempo.

Los resultados confirman que la plataforma basada en GO representa una alternativa tecnológica viable, rentable y reproducible para el desarrollo de diagnósticos rápidos. Entre sus ventajas destacan: la detección en tiempo real, la posibilidad de análisis múltiple de analitos en matrices biológicas reales (incluyendo anticuerpos de COVID-19 y bacterias como E. coli), y una base técnica sólida que sustenta su futura transferencia tecnológica y comercialización en esquemas de diagnóstico de mayor acceso poblacional.

Se recomienda el uso de placas recién preparadas para garantizar la máxima consistencia entre experimentos, dado que esto puede ser crítico para obtener resultados precisos en inmunoensayos de alta precisión. Los avances presentados en este trabajo contribuyen directamente al desarrollo de biosensores de tercera generación, con aplicaciones que van desde el diagnóstico de enfermedades infecciosas hasta la detección de biomarcadores de cáncer, vaginosis bacteriana y otras condiciones clínicas de relevancia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Morales-Narváez, E., & Dincer, C. (2020). The impact of biosensing in a pandemic outbreak: COVID-19. Biosensors and Bioelectronics, 163, 112274. https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112274
2. Peña-Bahamonde, J., Nguyen, H. N., Fanourakis, S. K., & Rodrigues, D. F. (2018). Recent advances in graphene-based biosensor technology with applications in life sciences. Journal of Nanobiotechnology, 16(1). https://doi.org/10.1186/s12951-018-0400-z
3. Ortiz-Riaño, E. J., Mancera-Zapata, D. L., Ulloa-Ramírez, M., Arce-Vega, F., & Morales-Narváez, E. (2022). Measurement of protein kinetics using a liquid phase-based biosensing platform. Analytical Chemistry, 94(45), 15553–15557. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c03305
4. Karunakaran, C., Rajkumar, R., & Bhargava, K. (2015). Introduction to Biosensors. Biosensors and Bioelectronics, 1–68. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803100-1.00001-3
5. Lakowicz, J. R. (1983). Quenching of Fluorescence. En Springer eBooks (pp. 257-301). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7658-7_9
6. Kim, J., Cote, L. J., Kim, F., & Huang, J. (2009). Visualizing graphene-based sheets by fluorescence quenching microscopy. Journal of the American Chemical Society, 132(1), 260–267. https://doi.org/10.1021/ja906730d
7. Lanz, E., Gregor, M., Slavík, J., & Kotyk, A. (1997). Use of FITC as a Fluorescent Probe for Intracellular pH Measurement. Journal of Fluorescence, 7(4), 317–319. https://doi.org/10.1023/a:1022586127784
8. Yildiz, G., Bolton-Warberg, M., & Awaja, F. (2021). Graphene and graphene oxide for bio-sensing: General properties and the effects of graphene ripples. Acta Biomaterialia, 131, 62–79. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.06.047
9. Ortiz-Riaño, E. J., Avila-Huerta, M. D., Mancera-Zapata, D. L., & Morales-Narváez, E. (2020). Microwell plates coated with graphene oxide enable advantageous real-time immunosensing platform. Biosensors and Bioelectronics, 165, 112319. https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112319
10. Lee, J., Kim, J., Kim, S., & Min, D. H. (2016). Biosensors based on graphene oxide and its biomedical application. Advanced Drug Delivery Reviews, 105, 275–287. https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.001

CLASIFICACIÓN DE EXOPLANETAS MEDIANTE REGRESIÓN LINEAL POR PARTES: UN ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RELACIÓN MASA-RADIO

José Miguel Mata López, Alma Elena Piceno Martínez, Fernando Arce Vega

Centro de Investigaciones en Óptica A.C.
jose.mata@cio.mx

RESUMEN

Desde el descubrimiento del primer exoplaneta en 1995, el número de detecciones se ha incrementado exponencialmente, hasta alcanzar actualmente una cantidad aproximada de 6000 exoplanetas confirmados. Este incremento en los datos obtenidos ha puesto de relieve la necesidad de proponer nuevos esquemas de clasificación que nos permitan comprender mejor la diversidad física de estos cuerpos celestes. Los planetas de nuestro sistema solar se clasifican en categorías tales como rocosos, gaseosos y helados; sin embargo, la población de exoplanetas recientemente descubiertos nos ha hecho replantearnos estas clases, y se han propuesto nuevas categorías como super-Tierras, sub-Neptunos o gigantes gaseosos. Como mencionan Müller et al.[1], la relación masa-radio (M-R) se ha convertido en la mejor herramienta para caracterizar exoplanetas. Esta relación nos permite estimar su densidad promedio, y por lo tanto, inferir su composición interna. El análisis de la relación M-R permite observar distintos regímenes en los que hay una marcada distinción en el comportamiento del radio de un planeta en función de su masa, lo que refleja transiciones entre distintos tipos de planetas. La principal clasificación que se puede realizar a partir de los regímenes anteriores es entre planetas Terrosos, Neptunianos y Gigantes Gaseosos, ya que se definen regiones en las que se pueden hallar exoplanetas similares a las super-Tierras, sub-Neptunos o gigantes de gas.[1,2] Se utilizó estadística descriptiva para analizar las propiedades relevantes de los exoplanetas en la base de datos empleada. Posteriormente, un modelo de regresión lineal por partes en el plano logarítmico fue implementado para identificar y estimar tanto los puntos de transición entre estas regiones, a partir de los propuestos por Müller et al.[1], como los parámetros de la relación M-R en ellas. De esta manera, certificamos la clasificación estadística de exoplanetas en las tres categorías anteriores, considerando la interrelación entre la masa y radio. A diferencia de los análisis realizados por Müller et al.[1] y Chen y Kipping[2], quienes utilizaron muestras de 688 exoplanetas y 316 objetos estelares, respectivamente, en este trabajo utilizamos una base de datos de aproximadamente 1900 exoplanetas confirmados en la enciclopedia de sistemas exoplanetarios[3], lo que permitió mejorar la aproximación estadística de los parámetros ajustados. Los resultados obtenidos se compararon con los reportados en artículos recientes, y se encontró una consistencia en las tendencias globales, así como una mayor robustez en la estimación de los parámetros, gracias al mayor volumen estadístico del análisis. Este trabajo confirma que el método de regresión lineal puede ser una herramienta estadística útil para clasificar exoplanetas utilizando la relación M-R, a partir de grandes bases de datos astronómicas.

INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de miles de exoplanetas durante las últimas décadas ha ampliado significativamente nuestro conocimiento sobre la formación y evolución de sistemas planetarios, permitiendo comparar modelos teóricos con comportamientos observacionales. Gracias a este incremento en el número de planetas detectados es posible comenzar a abordar preguntas fundamentales sobre nuestro lugar en el universo, tales como: ¿qué tan diferente es nuestro sistema solar de otros sistemas planetarios?, ¿planetas como la Tierra abundan en el univeso, o es un planeta raro?, ¿existen otro tipo de planetas diferentes a los que orbitan al Sol?, e incluso, ¿podrían existir condiciones favorables para la vida en otros mundos?.

En este contexto, comenzar a clasificar los exoplanetas descubiertos constituye una herramienta fundamental para comprender la diversidad de planetas que existen fuera de nuestro sistema solar. Actualmente, la relación Masa-Radio es uno de los métodos de clasificación más utilizados por la

comunidad científica[1,2,4,5,6,7,8]. Analizar esta relación nos permite hacer una estimación sobre la composición y estructura planetaria debido a que diferentes tipos de planetas como rocosos, neptunianos o gigantes gaseosos presentan comportamientos distintos en este plano[1,2,4]. Es por ello que la relación Masa-Radio es de gran utilidad para estudiar poblaciones de planetas y distinguir entre diferentes regímenes planetarios[1,2,4].

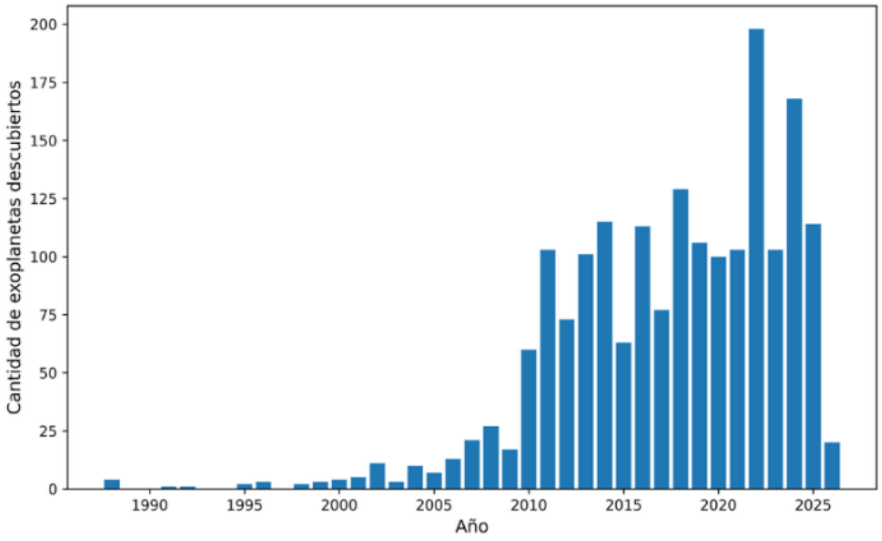
Estudios previos han mostrado que la distribución de exoplanetas en el plano Masa-Radio no sigue un comportamiento uniforme a lo largo del rango de masas observadas, por el contrario, los datos presentan cambios de pendiente que sugieren la existencia de diferentes regímenes asociados a distintos tipos de planetas como los antes ya mencionados[1,2,4,5,6]. De manera aproximada, estos trabajos describen la relación mediante una ley de potencias de la forma:

$$R = CM^{\alpha} \tag{1}$$

donde los parámetros C y α caracterizan el comportamiento de los datos en cada régimen. Estos parámetros variarán de planeta en planeta y, por lo tanto, al organizar los planetas por su masa, la descripción que dan del comportamiento planetario varía de un intervalo de masa a otro, esto lleva a la identificación de diferentes regiones de valores de la masa planetaria en la que tal descripción presenta consistencias significativas, llevando a reconocerlas como los regímenes de masas anteriores. El análisis de estas variaciones permite identificar transiciones entre poblaciones planetarias y estudiar las propiedades físicas que dominan en cada región.

Trabajos como el de Müller et al.[1] y el de Chen y Kipping[2] han abordado este problema para determinar los parámetros de la ley de potencias que describe a cada región así como los puntos de transición en términos de masas terrestres ($M_{\oplus}$) entre regímenes planetarios. Sin embargo, estos estudios se realizaron utilizando muestras considerablemente más pequeñas con aproximadamente 618 y 316 exoplanetas, respectivamente, utilizando diferentes bases de datos[9,10]. Catálogos de exoplanetas como The Exoplanet Encycoplaedia (Exoplanet.eu)[3] cuentan con aproximadamente 6000 exoplanetas con sus parámetros observacionales reportados en su base de datos. Gracias a esta disponibilidad de datos existe la oportunidad de reevaluar los resultados previos reportados en la literatura utilizando muestras significativamente mayores a las utilizadas previamente y, por lo tanto, potencialmente más representativas de la distribución de distintos tipos de exoplanetas.

En este trabajo, retomamos el enfoque propuesto en la literatura para analizar la relación Masa-Radio de los exoplanetas reportados en la actualidad y utilizando técnicas de análisis estadístico como la regresión lineal y el *sigma-clipping*, con una base de datos de mayor tamaño a la utilizada en trabajos previos, buscamos obtener una mejor aproximación de los parámetros C y α que



describan a cada régimen, así como redefinir los límites de transición entre regímenes planetarios.

Figura 1. Descubrimiento de exoplanetas a través de los años. Cantidad de exoplanetas descubiertos por año hasta la fecha. Exoplanetas confirmados en la base de datos de The Exoplanet Encycoplaedia donde es posible observar la evolución del crecimiento de la cantidad de datos observacionales reportados [3].

TEORÍA

Exoplanetas y su clasificación

Un exoplaneta es un planeta que orbita una estrella distinta al Sol. El primer exoplaneta fue confirmado en Octubre de 1995, orbitando 51 Pegasi, una estrella muy parecida al Sol en cuanto a masa y temperatura superficial se refiere[11]. El campo de estudio de estos planetas ha aumentado de manera acelerada gracias a nuevos métodos de detección y misiones espaciales como el James Webb Space Telescope[11].

De acuerdo con un artículo de David S. Spiegel et al. del 2013 donde abordan las diferentes estructuras de exoplanetas, reportan que estos pueden agruparse en tres grandes regímenes[4]. El primero de estos regímenes corresponde al de los planetas terrestres o rocosos, este tipo de planetas son caracterizados por estar compuestos principalmente por elementos como el silicio, magnesio, hierro, oxígeno y carbono, con estructuras internas dominadas por material sólido[4]. El segundo régimen está formado por planetas neptunianos o de masa intermedia, en el artículo, describen a los planetas de esta región con una gruesa envoltura gaseosa de hidrógeno y helio, que no constituye la mayor parte de la masa del planeta. Y finalmente, Spiegel y compañía, explican que la región de gigantes gaseosos es el régimen con los planetas de mayor masa cuyas extensas envolturas gaseosas están dominadas por hidrógeno y helio, donde la compresión gravitacional desempeña un papel fundamental en la estructura interna del planeta[4].

La relación Masa-Radio y el comportamiento de regímenes planetarios

La masa y el radio planetarios son dos propiedades fundamentales relacionadas a la estructura y composición interna de los planetas[7]. Distintos tipos de exoplanetas presentan comportamientos característicos dentro del plano Masa-Radio por las diferencias que existen entre su composición y estructura interna.

En este plano, los planetas rocosos se pueden aproximar como cuerpos con aproximadamente una densidad constante, por lo que su masa puede expresarse como:

$$M = \rho V \tag{2}$$

donde ρ representa la densidad y V el volumen del planeta. Considerando una geometría esférica,

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \tag{3}$$

se obtiene que

$$M = \frac{4}{3}\pi\rho R^3 = cR^3, \tag{4}$$

dado que la densidad se toma como constante, c es una constante y se tiene una relación de proporcionalidad

$$M \propto R^3 \tag{5}$$

y por tanto

$$R \propto M^{\frac{1}{3}} \tag{6}$$

Esta relación representa el comportamiento esperado para planetas dominados por material sólido y con baja compresión iterna[4].

Los planetas Neptunianos, poseen una gruesa envoltura gaseosa de hidrógeno y helio; sin embargo, esta envoltura de elementos ligeros no concentra la mayor parte de la masa planetaria[4]. Debido a que estos materiales presentan densidades bajas, pequeños incrementos en masa pueden producir aumentos relativamente grandes en el radio planetario. Como consecuencia, en el plano Masa-Radio, se eseperaría que estos planetas presentaran una pendiente mayor que la observada en planetas terrestres.

Por último, en planetas gigantes, cuya composición es dominada por hidrógeno y helio, la presión gravitacional es suficientemente grande para que los materiales que los componen se ionicen por presión y la presión por degeneración de electrones adquiera importancia, provocando que el radio disminuya al incrementar la masa[1]. Por lo tanto, en el plano Masa-Radio, se esperaría que estos planetas sigan una relación

$$R \propto M^{-1/3} \tag{7}$$

Transformación logarítmica

Como se mencionó previamente, la relación Masa-Radio suele describirse mediante una ley de potencias ($R = CM^{\alpha}$). Con el fin de facilitar el análisis estadístico de este tipo de relaciones es posible aplicar una transformación logarítmica a los datos, en este caso de masa y radio. Al aplicar el logaritmo base diez en ambos lados de una ecuación descrita como una ley de potencias se obtiene

$$\log_{10} R = \log_{10} C + \alpha \log_{10} M \tag{8}$$

lo que transforma la ley de potencias en una relación lineal. Esta transformación permite estimar los parámetros del modelo mediante técnicas de regresión lineal, donde la pendiente corresponde al exponente α y la ordenada al origen a $\log_{10} C$. La estimación de estos parámetros resulta de interés debido a que distintos tipos de planetas presentan comportamientos distintos dentro del plano Masa-Radio. Como hemos mencionado, en estudios previos se ha demostrado que la relación Masa-Radio no sigue una única ley de potencias a lo largo de todo el rango de masas, sino que existen regiones donde la pendiente cambia de manera significativa. Estos cambios en la pendiente se pueden asociar a la existencia de diferentes regiones planetarias correspondientes a distintos tipos de planetas representativos con composición y estructura interna particulares. De esta manera, el análisis de las pendientes obtenidas en diferentes intervalos de masa constituye una herramienta para estudiar la transición entre regímenes planetarios.

Ajuste de la relación lineal

El ajuste lineal lo realizamos mediante regresión lineal usando el método de mínimos cuadrados. El ajuste por mínimos cuadrados es un método estadístico con el que la relación entre dos variables estadísticas se expresa como una relación lineal, es ampliamente utilizado en estadística para ajustar rectas a un conjunto de datos presentados como puntos en el plano. Con este método, es posible determinar los parámetros de un modelo lineal minimizando la suma de los cuadrados de los residuos, los cuales son las diferencias entre los valores observados y los valores estimados por la recta del ajuste.

El modelo ajustado $\hat{y}$, puede expresarse como

$$\hat{y} = \mathrm{b}_0 + \mathrm{b}_1 \mathrm{x} \tag{9}$$

Donde las variables aleatorias son las siguientes $x = \log_{10} M$, $\hat{y} = \log_{10} R$, y los parámetros de la relación son $b_0 = \log_{10} C$ y $b_1 = \alpha$.

Coeficiente de determinación R^2

Una vez obtenido el ajuste lineal, es posible evaluar qué tan bien el modelo $\hat{y}$ representa la tendencia observada en los datos calculando el coeficiente de determinación R^2, para ello, primero se define el residuo asociado a cada observación como

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \tag{10}$$

donde para cada observación (i) y_i representa el valor observado y $\hat{y}_i$ el valor predicho por el modelo.

El coeficiente de determinación se calcula mediante

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{11}$$

donde $\bar{y}$ corresponde al promedio de las observaciones. El numerador representa la suma de cuadrados de los residuos, mientras que el denominador corresponde a la variabilidad total presente en los datos.

Con el valor de R^2 podemos cuantificar la proporción de variabilidad observada que puede ser explicada por el modelo ajustado. Un coeficiente de determinación cercano a la unidad sugiere que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia general de las observaciones.

Valores atípicos y *sigma-clipping* iterativo

En estadística, un dato atípico es una observación que se aleja de manera significativa del resto de los datos en un conjunto. La presencia de este tipo de datos puede afectar los parámetros obtenidos mediante un ajuste de regresión lineal, por lo que resulta conveniente identificarlos y tratarlos.

Con el fin de reducir la influencia de los valores atípicos sobre los ajustes, decidimos utilizar el método *sigma-clipping*. Gracias a esta herramienta, a partir de la distribución de los residuos del ajuste es posible detectar datos atípicos. Para cada dato (i) representando un exoplaneta de nuestra muestra definimos el residuo como

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \tag{12}$$

donde r_i representa el residuo asociado a la i-ésima observación, y_i corresponde al valor observado de $\log_{10} R_\oplus$ para dicho planeta y $\hat{y}_i$ al valor predicho por el modelo lineal obtenido después del ajuste a partir de la masa $\log_{10} M_\oplus$.

Una vez calculados los residuos para todos los exoplanetas en una región se calcula su desviación estándar s_r. Consideramos como atípico cualquier valor cuyo residuo satisficiera

$$r_i > 2s_r \tag{13}$$

donde s_r representa la desviación esándar de la distribución de residuos. Decidimos utilizar un valor de $2s_r$ debido a que con este valor observamos que existía un equilibrio entre eliminar valores atípicos y conservar datos que seguían la tendencia central.

Este procedimiento lo aplicamos de manera iterativa. Después de eliminar las observaciones identificadas como atípicas utilizando un primer ajuste mediante la ecuación (13) realizamos nuevamente un ajuste lineal utilizando la muestra depurada, recalculamos los residuos y aplicamos nuevamente el criterio de selección. De esta manera logramos obtener una muestra más representativa de la tendencia central en cada régimen planetario.

METODOLOGÍA

Para este trabajo utilizamos la base de datos pública The Exoplanet Encycoplaedia (Exoplanet.eu)[3], la cual recopila parámetros físicos de exoplanetas y su estrella anfitriona, respaldados por su reporte en la literatura científica. Al momento de su descarga la base de datos contenía aproximadamente 6000 exoplanetas. De estos datos se seleccionaron únicamente aquellos planetas para los cuales se reportaban de manera simultánea valores de masa y radio. Después de aplicar este filtro obtuvimos una muestra aproximada de 1880 exoplanetas.

El ajuste lineal lo hicimos región a región, comenzando por considerar las regiones de masa identificadas por Müller et al. y sobre los datos que pertenecían a cada una de estas regiones realizamos los ajustes lineales por mínimos cuadrados. Una vez obtenidos los ajustes iniciales, calculamos los residuos entre las observaciones y los valores predichos por nuestros modelos para posteriormente remover los datos atípicos utilizando un criterio de *sigma-clipping* de $2s_r$, típico de tal método, debido a que con este valor pudimos mantener un equilibrio entre identificar y eliminar observaciones atípicas que pudieran modificar de manera importante los parámetros de ajuste y conservar datos significativos para el comportamiento de los tipos planetarios representativos en las diferentes regiones.

Después de tratar con los datos atípicos aplicando dos veces *sigma-clipping* recalculamos los ajustes lineales.

Posteriormente, procedimos a reevaluar la identificación de las regiones que presentaron un comportamiento diferenciado en la relación Masa-Radio. Para esto encontramos los puntos de intersección de los ajustes que describían el comportamiento en dos regímenes vecinos, los cuales representaban los puntos de transición de un comportamiento a otro. Con esto obtuvimos nuevas regiones en las que identificamos sus respectivos conjuntos de datos y distribuciones estadísticas, repitiendo los ajustes lineales que dan los comportamientos propios de cada región. Realizamos este proceso iterativamente para refinar la estimación de tales puntos de transición. Considerando dos regiones consecutivas:

$$y_{ci=b_{0,ci}+b_{1,ci}x} \text{ y } y_{ci=b_{0,ci}+b_{1,ci}x} \tag{14}$$

Calculamos la intersección igualando ambos ajustes y despejando x, la cual será la masa en la intersección:

$$M(intersección_{ci-ci+1}) \equiv I_{ci-i+1} = \frac{b_{0,ci+1} - b_{0,ci}}{b_{1,ci} - b_{1,ci+1}} \tag{15}$$

Este procedimiento lo iteramos diez veces, con lo que obtuvimos una aproximación progresivamente más consistente entre los valores calculados de las intersecciones. Finalmente, evaluamos nuestros ajustes utilizando el coeficiente de determinación R^2.

Todo el procesamiento y análisis de los datos lo realizamos utilizando el lenguaje de programación Python incluidas las gráficas reportadas mediante bibliotecas especializadas para análisis científico como Numpy, Pandas y Matplotlib.

RESULTADOS

Con el fin de realizar una descripción estadística de los datos observacionales usando estadística descriptiva, construimos histogramas para las distribuciones de masa y radio en escala logarítmica. En la Figura 2 podemos observar que los datos en nuestra muestra no se distribuyen de manera uniforme a lo largo del rango de masas y radios considerados. En esta gráfica, es posible observar una mayor concentración de exoplanetas en la región correspondiente de masas intermedias, mientras que los objetos de muy baja masa o muy alta masa se encuentran menos representados. Por su parte, en la Figura 3 es posible observar que la distribución de radios no es uniforme y presenta cocentraciones de objetos en intervalos específicos. Esto sugiere la presencia de poblaciones planetarias con características físicas distintas dentro de la muestra analizada.

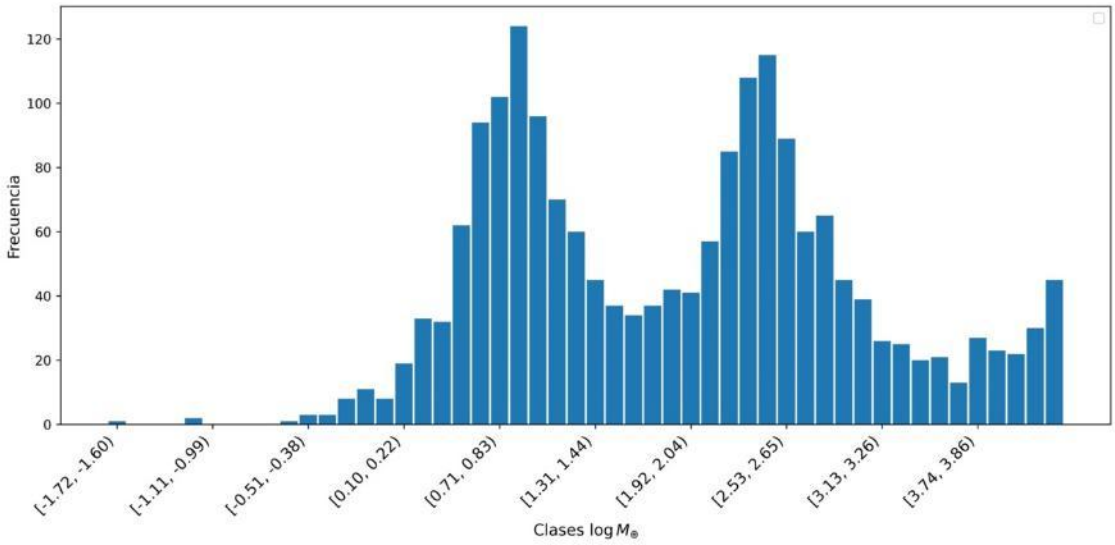


Figura 2. Histograma de frecuencias para la variable $\log_{10} \mathrm{M}_\oplus$ utilizando $\mathrm{k} = 50$ clases. El parámetro k representa el número de intervalos en los que se dividió el rango completo de masa. Cada barra muestra la cantidad de exoplanetas cuya masa, expresada en escala logarítmica y unidades de masa terrestres, se encuentra dentro del intervalo correspondiente.

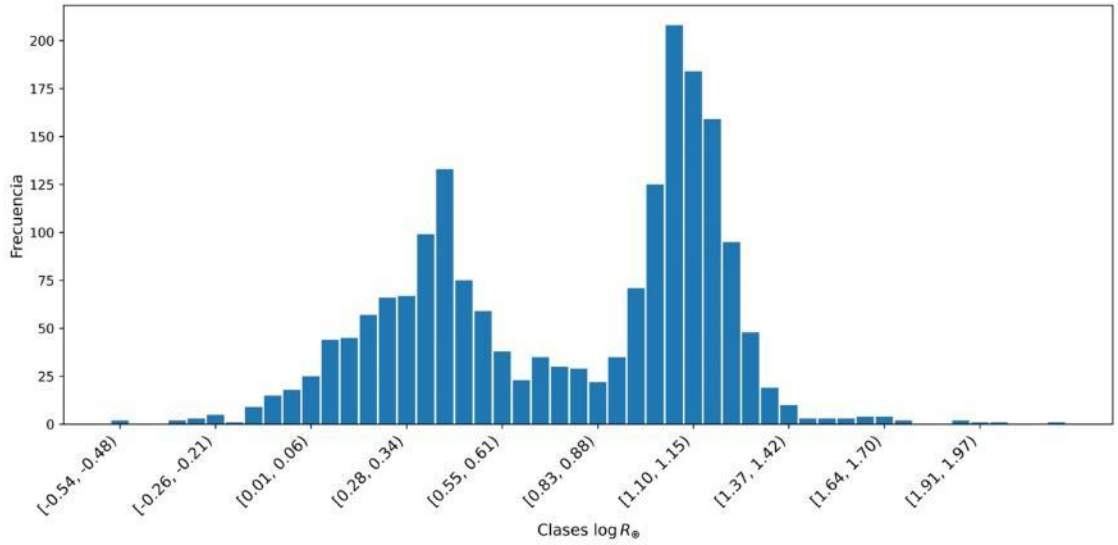


Figura 3. Histograma de frecuencias para la $\log_{10} \mathrm{R}_\oplus$ utilizando $\mathrm{k} = 50$ clases. Cada barra muestra la cantidad de exoplanetas cuyo radio, expresado en escala logarítmica y unidades de radios terrestres se encuentra dentro del intervalo correspondiente. Con esta visualización podemos observar de mejor manera la distribución de frecuencias de la muestra e identificar regiones con mayor concentración de objetos.

La Tabla 1 muestra los valores de los parámetros que calculamos en diferentes etapas del procedimiento del ajuste. En la primera fila (“Original”) podemos observar los parámetros obtenidos de manera inicial al realizar el primer ajuste con los límites de transición reportados por Müller et al. En la segunda fila de la tabla (“Clipped”) se reportan los valores obtenidos en los segundos ajustes después de haber aplicado *sigma-clipping*. Finalmente, en las filas posteriores, reportamos los valores obtenidos para cada uno de los parámetros conforme haciamos las iteraciones para el ajuste de los puntos de transición.

Al analizar los valores obtenidos en cada columna, se observa que las variaciones entre iteraciones se reducen progresivamente, esto nos indica una estabilización en los parámetros y los límites de transición entre regiones calculados. Esto sugiere que el procedimiento iterativo alcanza una solución consistene después de un número reducido de 10 iteraciones.

Tabla 1. Valores de los parámetros obtenidos en las distitnas etapas del trabajo, donde la fila "Original" corresponde al primer ajuste realizado utilizando los límites de transición reportados por Müller et al. La fila "Clipped" muestra los resultados después de haber aplicado *sigma-clipping* y en las filas posteriores se presentan los parámetros calculados en cada iteración del algoritmo. Los subíndices $c1$, $c2$ y $c3$ identifican respectivamente la primera, segunda y tercera región planetaria consideradas en el ajuste.

Iteracion	R^2_{c1}	R^2_{c2}	R^2_{c3}	I_{1-2}	I_{2-3}	$b_{0,c1}$	$b_{1,c1}$	$b_{0,c2}$	$b_{1,c2}$	$b_{0,c3}$	$b_{1,c3}$
Original	0.32	0.56	0.00	4.37	127.00	0.02	0.31	-0.05	0.50	1.10	-0.00
Clipped	0.64	0.81	0.07	3.97	160.14	0.02	0.32	-0.12	0.57	1.23	-0.03
1	0.64	0.85	0.08	3.75	159.81	0.02	0.31	-0.12	0.58	1.24	-0.04
2	0.64	0.85	0.08	3.66	159.89	0.02	0.31	-0.12	0.58	1.24	-0.04
3	0.64	0.85	0.08	3.63	160.04	0.02	0.31	-0.12	0.57	1.24	-0.04
4	0.64	0.85	0.08	3.52	160.33	0.02	0.30	-0.12	0.57	1.24	-0.04
5	0.63	0.85	0.08	3.44	160.56	0.02	0.30	-0.12	0.57	1.24	-0.04
6	0.63	0.85	0.08	3.25	161.74	0.00	0.29	-0.12	0.57	1.24	-0.04
7	0.63	0.85	0.08	2.99	161.87	0.01	0.28	-0.11	0.57	1.24	-0.04
8	0.62	0.86	0.08	2.93	161.94	0.01	0.28	-0.11	0.57	1.24	-0.04
9	0.63	0.86	0.08	2.76	162.48	0.01	0.27	-0.11	0.57	1.24	-0.04
10	0.63	0.86	0.08	2.72	162.54	0.01	0.27	-0.11	0.57	1.24	-0.04

En la Figura 4 presentamos una comparación entre los ajustes obtenidos en este trabajo y aquellos reportados en estudios previos[1,2]. También se muestran los datos originales y los datos después de haber aplicado *sigma-clipping*. Asimismo, incluimos los límites de transición calculados por cada autor. Dentro de esta figura podemos observar que el ajuste obtenido para cada uno de los regímenes reproduce adecuadamente la tendencia central de los datos observacionales y es consistente con los regímenes identificados en la literatura[4]. Podemos observar que los límites de transición que recalculamos difieren de los reportados en otros trabajos[1,2].

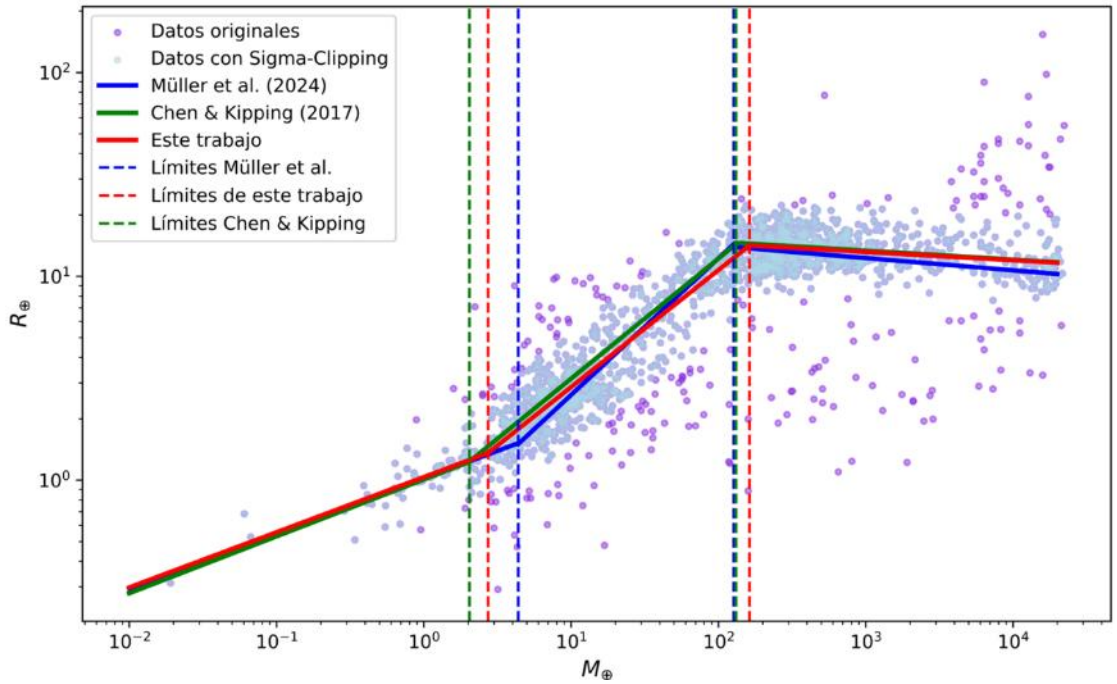


Figura 4. Comparación de los ajustes obtenidos en el plano Masa-Radio en este trabajo con los reportados por Chen y Kipping (2017) y Müller et al. (2024). Los puntos morados representan los datos originales donde cada punto es un exoplaneta, mientras que los puntos en azul claro corresponden a los datos después de aplicar *sigma-clipping*. Las lineas continuas representan los ajustes obtenidos en cada trabajo, y las líneas punteadas verticales indican los límites de transición entre regímenes reportados por cada autor.

En la Tabla 2 presentamos una comparación de los parámetros recalculados con los reportados en trabajos previos[1,2]. En esta tabla podemos observar con mejor claridad las diferencias observadas que comentamos respecto a la Figura 4, donde encontramos la cantidad de datos utilizados en cada estudio, los límites de intersección entre regiones (I_{1-2}, e $I_{2,-3}$), los valores de las pendientes en cada región ($b_{1,c1}, b_{1,c2}, b_{1,c3}$) y los coeficientes de determinación (R^2_{c1}, R^2_{c2}, R^2_{c3}) de cada ajuste con respecto de la colección de datos considerada en este estudio.

Trabajo	Datos	I_{1-2}	I_{2-3}	$b_{0,c1}$	$b_{1,c1}$	$b_{0,c2}$	$b_{1,c2}$	$b_{0,c3}$	$b_{1,c3}$	R^2_{c1}	R^2_{c2}	R^2_{c3}
Chen & Kipping (2017)	316	2.04	131.58	0.003	0.27	-0.09	0.58	1.258	-0.04	0.27	0.49	-0.03
Müller et al. (2024)	688	4.37	127	0.008	0.27	-0.25	0.67	1.243	-0.06	0.28	0.50	-0.06
Este trabajo	1880	2.72	162.54	0.01	0.27	-0.11	0.57	1.247	-0.04	0.63	0.86	0.08

Tabla 2. Comparación de los parámetros que describen la relación Masa-Radio en distintos estudios. Se incluyen las masas de transición entre regímenes planetarios, los parámetros de las leyes de potencia ajustadas en cada región y los coeficientes de determinación R^2 correspondientes a cada ajuste.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran la existencia de tres regímenes bien diferenciados dentro del plano Masa-Radio. En la región de $M < 2.7M_{\oplus}$ se obtuvo una relación $R \propto M^{0.27}$, este valor cercano al exponente teórico esperado de $1/3$ para planetas con densidad constante sugiere que dentro de esta región dominan planetas rocosos[4]. En la región de masas intermedias $2.7M_{\oplus} < M < 162.5M_{\oplus}$ obtuvimos una relación $R \propto M^{0.57}$, esta pendiente mayor a las obtenidas en las otras regiones nos dice que al aumentar la masa el radio aumenta de manera considerable, lo que sugiere que en esta región abundan los planetas con envolturas gaseosas[4]. Finalmente, en la región $162.5M_{\oplus} < M$ obtuvimos una relación $R \propto M^{-0.04}$, este exponente negativo nos dice que al seguir aumentando la masa, el radio no incrementa, al contrario, comienza a reducirse, esto coincide con lo discutido en la teoría, por lo que en esta región abundan planetas donde la compresión gravitacional domina, lo que ocasiona que incrementos en masa disminuyan el radio[4].

Este trabajo permitió reevaluar la relación Masa-Radio de los exoplanetas utilizando una muestra significativamente mayor a las utilizadas en trabajos previos[1,2]. Este análisis realizado con aproximadamente 1880 datos permitió obtener nuevos valores para los límites de transición entre regímenes planetarios y estimar los parámetros de la ley de potencias asociados a cada región. Asimismo, la implementación de un método iterativo para recalcular los puntos de transición produjo resultados estables y consistentes con lo discutido en la literatura[4]. Esto constituye una alternativa para el estudio de clasificación de exoplanetas a partir del estudio de esta relación.

Finalmente la disponibilidad de otros parámetros reportados en la base de datos de The Exoplanet Encyclopaedia nos motiva a extender este análisis en futuras investigaciones incorporando otras variables físicas relevantes, como la metalicidad de la estrella anfitriona que orbita el planeta o la temperatura superficial mediante modelos multivariables. Además, la aplicación de técnicas de *machine-learning* consideramos podría contribuir a identificar patrones más complejos en los datos y mejorar los esquemas actuales de clasificación planetaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. Müller, J. Baron, R. Helled, F. Bouchy y L. Parc, “The mass–radius relation of exoplanets, revisited”, Astronomy & Astrophysics, Vol. 686, 2024, A296.
2. J. Chen y D. Kipping, “Probabilistic Forecasting of the Masses and Radii of Other Worlds”, The Astrophysical Journal, Vol. 834, No. 1, 2017, Art. 17.
3. J. Schneider et al., “The Exoplanet Encyclopaedia”, Base de datos en línea, 2026. Disponible en: exoplanet.eu. Recuperada el día 26 de febrero del 2026.
4. D. S. Spiegel, J. J. Fortney y C. Sotin, “Structure of Exoplanets”, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 111, No. 35, 2014, pp. 12622–12627.
5. J. F. Otegi, F. Bouchy y R. Helled, “Revisited mass-radius relations for exoplanets below 120 Earth masses”, Astronomy & Astrophysics, Vol. 634, 2020, A43.
6. S. Ulmer-Moll, N. C. Santos, P. Figueira, J. Brinchmann y J. P. Faria, “Beyond the exoplanet mass-radius relation”, Astronomy & Astrophysics, Vol. 640, 2020, A103.
7. I. de Pater y J. J. Lissauer, Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2015, Sección 14.2.5 “Mass–Radius Relationship”, pp. 396–398.
8. S. Seager, M. Kuchner, C. A. Hier-Majumder y B. Militzer, “Mass-Radius Relationships for Solid Exoplanets”, The Astrophysical Journal, Vol. 669, No. 2, 2007, pp. 1279–1297.
9. S. Udry, y colaboradores, “The Data & Analysis Center for Exoplanets (DACE)”, Base de datos en línea, Universidad de Ginebra, Suiza. Disponible en: dace.unige.ch.
10. J. Southworth, “TEPCat: The Transiting Extrasolar Planet Catalogue”, Universe, Vol. 12, No. 3, 2026, Art. 62. Disponible en: astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/html-catalogue.html.
11. National Aeronautics and Space Administration (NASA), “Exoplanets”, NASA Science, 2025. Disponible en: science.nasa.gov/exoplanets/.

DISEÑO Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD EN UN SISTEMA DE MOVIMIENTO CIRCULAR CON RADIO VARIABLE MEDIANTE ADQUISICIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL

Romel Rubicel Flores Gamez[1], Shailly Sánchez Villarruel[1], Israel Ramirez Flores[1], José Luis González Vera[1], Israel Olivares Ornelas[1], Edgar Omar Montes Ramírez[1], María Eugenia Sánchez Morales[2*]

[1] Doctorado en Ingeniería, Centro Universitario de la Ciénega (CUCiénega), [2] Departamento de Ciencias Tecnológicas, Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara. eugenia.sanchez@academicos.udg.mx

RESUMEN

La mecánica clásica establece fundamentos para comprender la dinámica de los cuerpos; sin embargo, el estudio experimental de sistemas con parámetros variables presenta desafíos analíticos significativos. Tradicionalmente, la Segunda Ley de Newton se aplica y evalúa entornos bajo condiciones de masa y aceleración constantes. Al introducir un radio variable en un sistema de movimiento circular, la relación entre, la aceleración angular y la velocidad lineal adquiere una complejidad que requiere de precisión para su validación. Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo principal determinar y analizar experimentalmente la variación de la velocidad lineal en un sistema dinámico rotacional caracterizado por un radio variable continuo. Para lograrlo, se diseñó e implementó un montaje experimental original consistente en una polea fabricada, el sistema es impulsado por la caída libre de una masa de prueba (una botella de agua) acoplada mediante una cuerda y a medida que la masa desciende se desenrolla progresivamente sobre la polea, el radio de giro se modifica en cada instante temporal [1]. La captura de los datos se realizó empleando el sistema de adquisición PASCO Xplorer GLX, acoplado al sensor de movimiento rotacional, lo que permitió registrar con alta resolución y en tiempo real la posición, velocidad y aceleración angular del sistema [2]. A partir del procesamiento de los datos se logró establecer una correlación directa entre la variación de la velocidad de la masa descendente y el cambio continuo del radio de la polea a lo largo del tiempo [3,4].

INTRODUCCIÓN

El movimiento circular es un fenómeno físico presente en una gran variedad de sistemas mecánicos y tecnológicos, por lo que su estudio resulta fundamental para comprender el comportamiento de cuerpos sometidos a trayectorias curvilíneas. Dentro de este campo, el análisis de sistemas con radio variable permite explorar cómo interactúan magnitudes como la velocidad angular, la velocidad lineal y la aceleración cuando las condiciones geométricas del movimiento cambian durante el proceso.

La experimentación constituye una herramienta esencial para relacionar los modelos teóricos con el comportamiento real de los sistemas físicos. Gracias al desarrollo de tecnologías de adquisición de datos, es posible registrar y analizar variables cinemáticas en tiempo real, facilitando una comprensión más profunda de los fenómenos asociados a la dinámica rotacional. Entre estas herramientas destaca el sistema PASCO Xplorer GLX, el cual permite obtener mediciones precisas y generar representaciones gráficas útiles para el análisis experimental [5].

En el presente proyecto, desarrollado en el marco del programa Mujer en la Ciencia [6], se estudió un sistema de movimiento circular con radio variable mediante el uso del equipo PASCO Xplorer GLX. Para ello, se emplearon diferentes masas como factor de estudio, con el propósito de registrar y analizar las variaciones de las magnitudes involucradas en el movimiento. Los datos obtenidos fueron organizados y representados gráficamente para facilitar su interpretación y comparación paramétrica [7].

El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de un sistema rotacional con radio variable bajo distintas condiciones de carga, así como fortalecer las competencias científicas y experimentales de las participantes. Asimismo, el proyecto busca fomentar el interés por la investigación y promover la participación de las mujeres en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM), destacando la importancia de su contribución al desarrollo científico y tecnológico.

TRABAJO EXPERIMENTAL

La cinemática rotacional estudia el movimiento de cuerpos que giran alrededor de un eje. En un movimiento circular, la velocidad lineal o tangencial de un punto depende de la velocidad angular y de la distancia al eje de rotación [8]. Cuando el radio permanece constante, esta relación se expresa mediante: $v(t) = \omega(t) \cdot r(t)$.

En sistemas de radio variable, tanto la velocidad angular como el radio pueden cambiar con el tiempo, por lo que la velocidad lineal también experimenta variaciones continuas que incluyen tanto componentes radiales como transversales [9,10]. El análisis de estas magnitudes permite comprender el comportamiento cinemático del sistema y establecer relaciones entre las variables que describen su movimiento. La aceleración angular (α) representa la variación de la velocidad angular respecto al tiempo y constituye una de las principales variables utilizadas para caracterizar la dinámica de rotación de un cuerpo [8,10].

Para el estudio experimental se empleó el sistema PASCO Xplorer GLX, un dispositivo de adquisición de datos que permite registrar variables cinemáticas en tiempo real como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Sensor de movimiento rotacional PASCO, conectado a la interfaz PASCO Xplorer GLX para registrar posición, velocidad y aceleración angulares en tiempo real.

El equipo utiliza sensores de movimiento rotacional, los cuales detectan el desplazamiento angular del sistema y generan información digital mediante un sistema de polea fabricada con impresión 3D con un radio variable como se muestra en la Figura 2, en el cual el radio de desenrollado disminuye a medida que la cuerda se libera para su análisis.

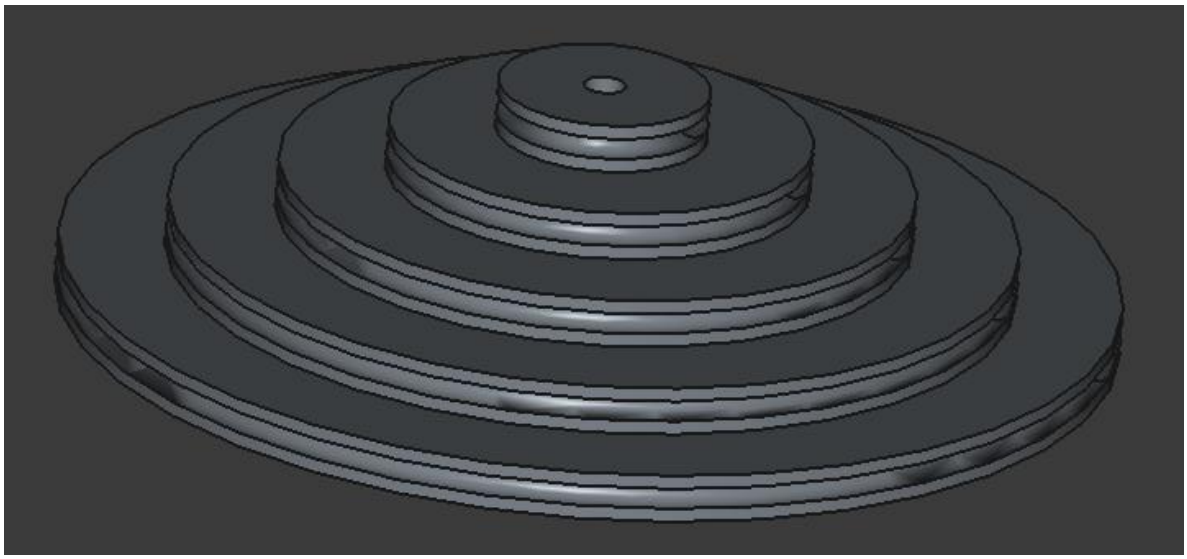


Figura 2. Modelo 3D de la Polea escalonada con radio variable

A partir de los datos obtenidos, el software calcula automáticamente variables como la velocidad y la aceleración angulares. Estas herramientas facilitan la observación y comparación del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones experimentales.

El sistema es impulsado por la caída libre de una masa de prueba, constituida por una botella de agua con pesos variables de 10g, 20g, 30g, 40g y 50g, la cual se encuentra acoplada a la polea mediante una cuerda. A medida que la masa desciende y se desenrolla progresivamente, el radio de giro se modifica en cada instante temporal.

Para el análisis, los datos obtenidos se segmentaron en tres intervalos denominados Pendiente 1, 2 y 3, los cuales corresponden a los radios grande, medio y pequeño, respectivamente.

RESULTADOS

A partir del procesamiento de los datos, se logró establecer una correlación directa entre la variación de la velocidad de la masa descendente y el cambio continuo del radio de la polea a lo largo del tiempo. Esta relación se puede observar en los cambios de pendiente que sufren las gráficas obtenidas de los datos recolectados como se muestra en la Figura 3 a la Figura 7

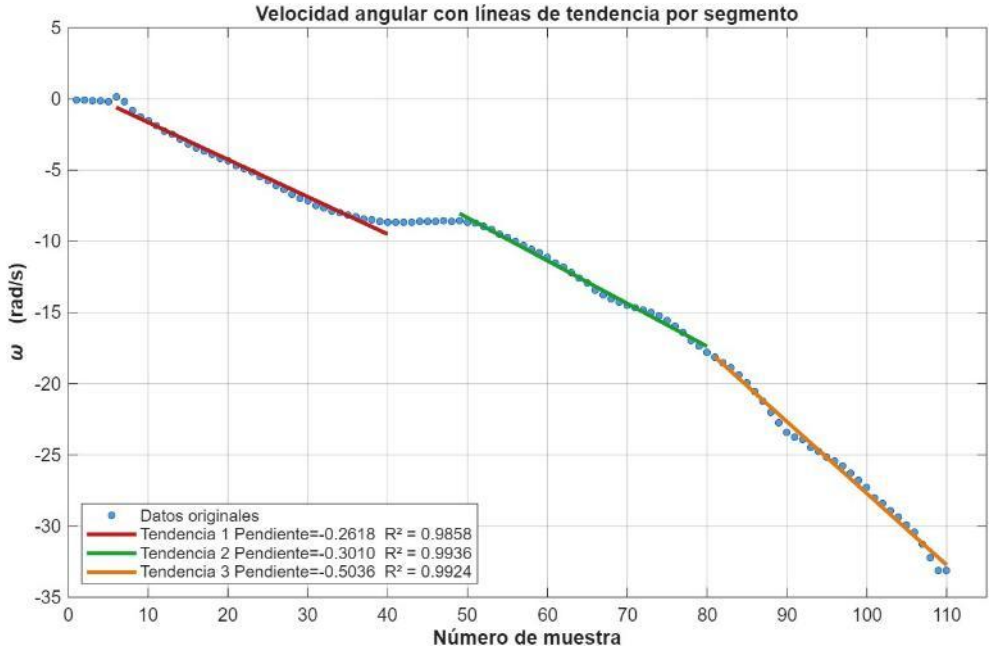


Figura 3. Gráfica de velocidad angular con masa de 10 gramos.

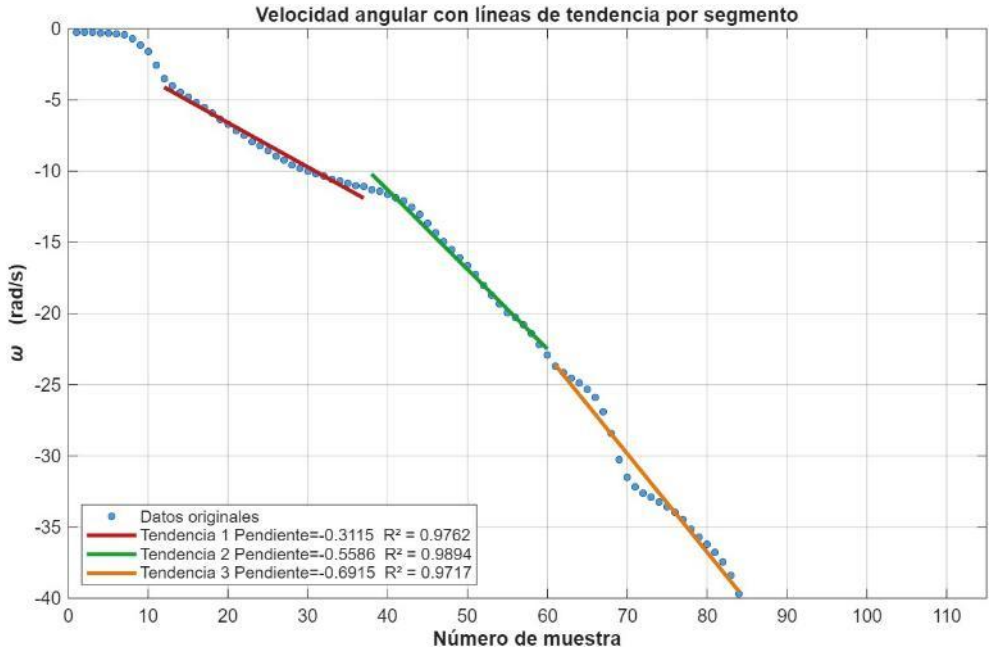


Figura 4. Gráfica de velocidad angular con masa de 20 gramos.

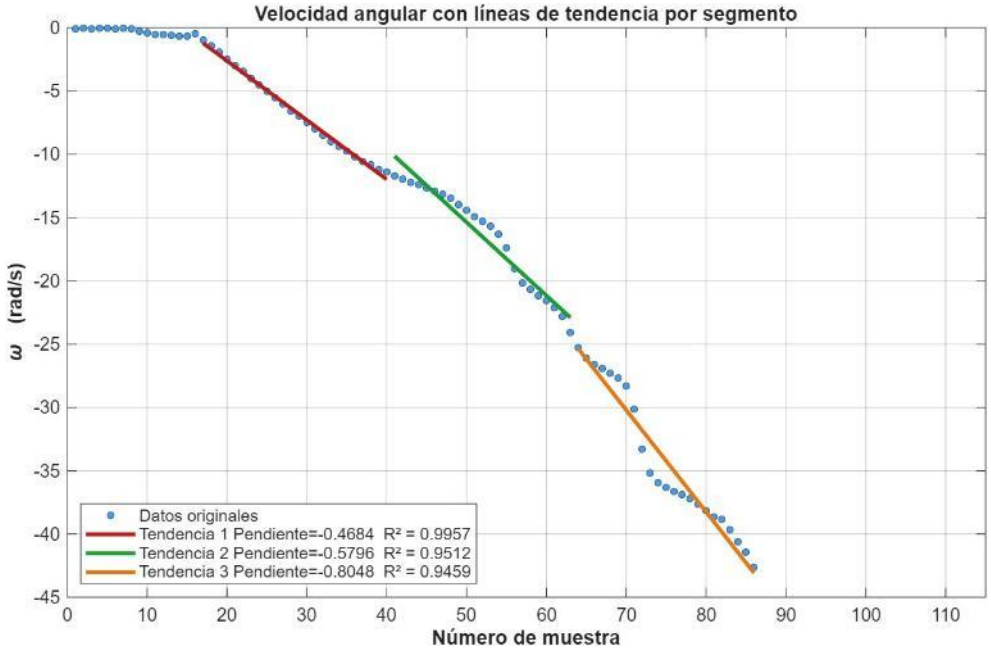


Figura 5. Gráfica de velocidad angular con masa de 30 gramos.

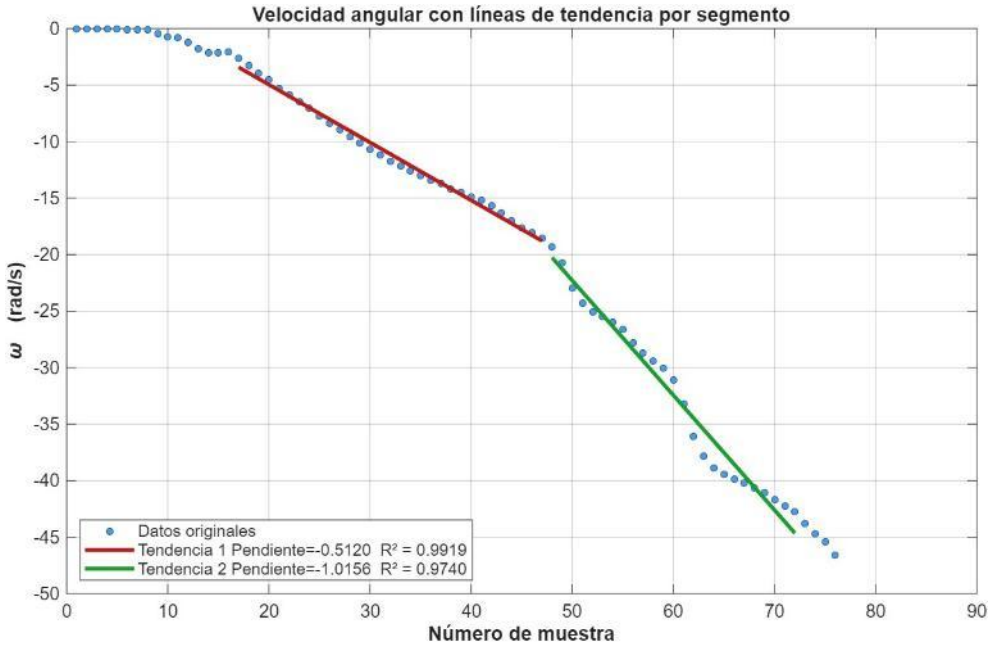


Figura 6. Gráfica de velocidad angular con masa de 40 gramos.

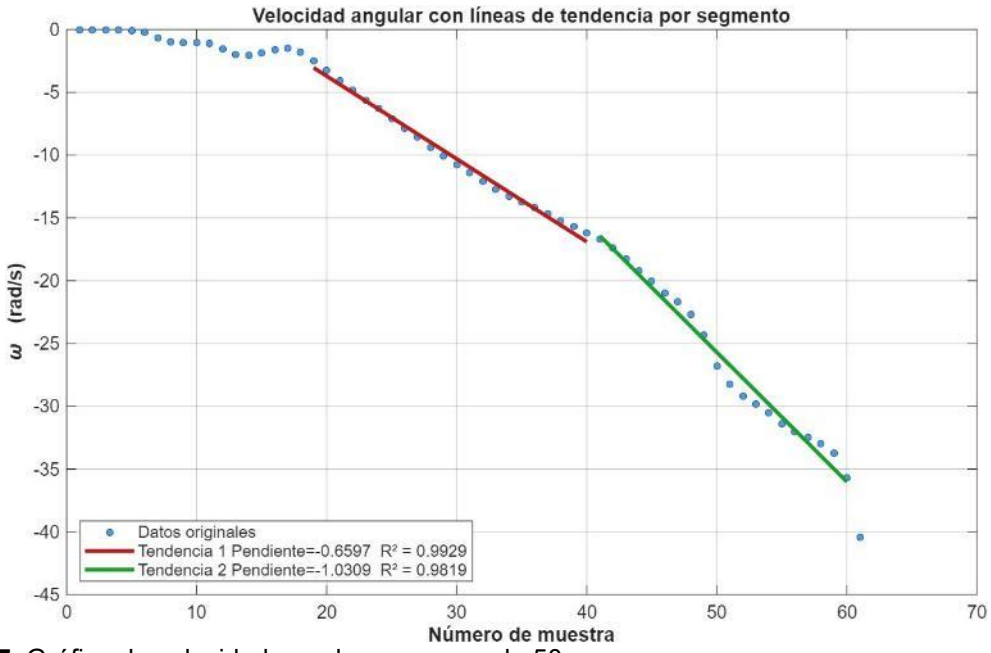


Figura 7. Gráfica de velocidad angular con masa de 50 gramos.

En primer lugar, para la configuración con 10 g de masa, como se observa en la Figura 3, la velocidad angular parte de un estado de reposo, seguido de un incremento progresivo hasta detenerse. Por otro lado, en la Figura 4 se muestra el arreglo con 20 g; al someter el sistema al doble de masa, la pendiente inicial resulta mayor, iniciando con un valor de -0.3115 en comparación con los -0.2618 registrados para la muestra de 10 g. Asimismo, en las configuraciones de 30 g a 50 g, las gráficas revelan una tendencia evidente: a medida que aumenta la masa, la variación de la pendiente se hace significativamente más pronunciada. Finalmente, cabe destacar que el signo negativo en los datos hace referencia a la dirección del movimiento, lo cual corresponde, en estos casos, a una masa descendente con rotación en sentido horario.

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las pendientes correspondientes a la aceleración angular (en rad/s²) para cada una de las masas de prueba en cada etapa del radio.

VELOCIDAD ANGULAR			
Peso	Pendiente 1	Pendiente 2	Pendiente 3
10g	-0.2618	-0.301	-0.5036
20g	-0.3115	-0.5586	-0.6915
30g	-0.4684	-0.5796	-0.8048
40g	-0.512	-1.0156	-
50g	-0.6597	-1.0309	-

Tabla 1. Datos obtenidos con cinco diferentes masas.

Se observó que, para todas las masas evaluadas, el signo negativo en los datos indica la dirección del movimiento, en estos casos una masa que desciende y tiene rotación horaria.

La magnitud de la aceleración angular aumenta durante la transición del primer al segundo intervalo, coincidiendo con la disminución del radio. No obstante, en las masas de mayor magnitud, la Pendiente 3 no pudo ser calculada debido a los datos excedían el rango de detección del equipo.

Estos cambios en la aceleración angular, originados exclusivamente por la variación geométrica del radio, se transfieren de manera directa a la velocidad lineal $v = \omega * r$ y a la aceleración tangencial $\alpha_t = \alpha * r$, permitiendo así la verificación empírica de estas relaciones cinemáticas.

CONCLUCIÓN

El desarrollo experimental del sistema de movimiento circular con radio variable permitió analizar la relación entre la velocidad angular, la velocidad lineal y la aceleración angular de un cuerpo sometido a movimiento rotacional y mediante el uso del sistema PASCO Xplorer GLX fue posible registrar estas variables en tiempo real y representar su comportamiento mediante gráficas para diferentes masas aplicadas al sistema.

Los resultados obtenidos mostraron que el aumento de la masa produce un incremento en la velocidad angular y en la aceleración angular, evidenciando la influencia de la carga sobre la dinámica del movimiento. Asimismo, se observó una relación consistente entre la velocidad angular y la velocidad lineal, de acuerdo con los principios fundamentales de la cinemática rotacional. Aunque los datos de aceleración presentaron pequeñas fluctuaciones asociadas al proceso de adquisición y tratamiento de datos, el comportamiento general de las variables registradas fue coherente con los fundamentos teóricos del movimiento circular y la dinámica rotacional. Esto permitió cumplir el objetivo de analizar experimentalmente el comportamiento de un sistema con radio variable utilizando diferentes masas. Finalmente, este proyecto, desarrollado en el marco de “Mujer en la Ciencia”, fortaleció habilidades relacionadas con la experimentación, el análisis de datos y la interpretación de fenómenos físicos, además de promover la participación de las mujeres en las áreas STEM y su contribución al desarrollo científico y tecnológico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Taylor, J. R. *Classical mechanics,* University Science Books, 2005.
2. Serway, R. A., Jewett, J. W. *Física para ciencias e ingeniería*, 9.ª ed.; Cengage Learning, 2014.
3. Hibbeler, R. C. *Ingeniería mecánica: Dinámica,* 14.ª ed.; Pearson Educación, 2016.
4. Young, H. D., Freedman, R. A., Ford, A. L. *Sears y Zemansky: Física universitaria con física moderna,* 14.ª ed.; Pearson, 2018.
5. PASCO Scientific. *PASCO Xplorer GLX User Guide;* PASCO Scientific, 2022.
6. UNESCO Women in Science, Women in science, UNESCO Publishing, 2023.
7. Chapra, S. C., Canale, R. P. *Métodos numéricos para ingenieros*, 7.ªed.; McGraw-Hill Education, 2015.
8. Beer, F. P.,Johnston, E. R., Mazurek, D. F., Cornwell, P.J., Self, B. P. *Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica,* 11.ª ed.; McGraw-Hill Education, , 2015.
9. Ginsberg, J. H. *Engineering dynamics,* Cambridge University Press, 2008.
10. Marion,J. B., Thornton, S. T. *Classical dynamics of particles and systems,* 5th ed.; Brooks Cole, 2003.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA PLACA FLEXIBLE INMERSA EN UN FLUJO DE AIRE AXIAL

Deiby Alexander Pulido Caviedes[1], Raúl Alfredo Rendón Santoyo[2], Anne Cros[3]

Universidad de Guadalajara.
deiby.pulido1540@alumnos.udg.mx

RESUMEN

Las placas flexibles expuestas a flujos de aire uniformes se utilizan frecuentemente como sistemas simplificados para estudiar problemas de interacción fluido-estructura. En estos sistemas, el aumento de la velocidad del aire puede dar lugar a distintos tipos de inestabilidad, entre los cuales se encuentra el aleteo [1,2,3]. En este trabajo se presenta un análisis teórico de una placa rectangular flexible inmersa en un flujo de aire axial bajo la configuración articulada-libre. Para ello, se emplea la metodología descrita en [2] para calcular la diferencia de presión entre ambas caras de la placa en el espacio de Fourier. La ecuación de movimiento del sistema está gobernada por tres números adimensionales: la razón de masa entre la placa y el fluido circundante ($\boldsymbol{M}$), la relación de aspecto ($\boldsymbol{H}$) y una velocidad adimensional ($\boldsymbol{U}$). Mediante el método de Galerkin se determinan las frecuencias de vibración de los dos primeros modos en función de la velocidad del aire. Los cálculos se realizan para $\boldsymbol{H = 1.0}$, $\boldsymbol{M = 1.0}$, y $\boldsymbol{U}$ variando de $\boldsymbol{0}$ a $\boldsymbol{18}$. Se observa que la frecuencia real del primer modo de vibración disminuye con el aumento de la velocidad del viento hasta alcanzar una frecuencia nula, lo que corresponde a una deflexión estática de la placa. Al continuar aumentando la velocidad, la parte imaginaria del primer modo cambia de signo, indicando la aparición de una inestabilidad de tipo divergencia en $\boldsymbol{U = 6.8}$. Para velocidades mayores, la parte imaginaria del segundo modo cruza por cero en $\boldsymbol{U = 13.2}$, mientras que la parte real permanece distinta de cero, lo que corresponde a una inestabilidad de tipo aleteo. Los resultados se comparan con los correspondientes a la configuración empotrada-libre [2], donde se observa únicamente la inestabilidad por aleteo, con un umbral crítico de velocidad inferior al de la configuración articulada-libre. Aunque estos fenómenos han sido estudiados previamente, la configuración articulada-libre ha recibido menor atención en comparación con la configuración empotrada-libre.

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XIX, el fenómeno de inestabilidad asociado a la interacción fluido–estructura ha sido objeto de interés en diversos contextos físicos. Lord Rayleigh (1878) señaló que la inestabilidad en chorros de agua podía explicar las oscilaciones de las velas de los barcos y de las banderas [4]. Posteriormente, Fairthorne (1930) demostró que era posible estudiar la resistencia de las banderas publicitarias arrastradas por un avión mediante experimentos con banderas colocadas en un túnel de viento [5]. Una década después, Peters (1940) describió la inestabilidad de láminas líquidas por analogía con una bandera [6].

El interés por estos fenómenos aumentó a partir de problemas aeroelásticos en ingeniería aeronáutica. Un caso emblemático fue el del avión Lockheed L-188 Electra, cuyos accidentes fueron atribuidos a un fenómeno conocido como *whirl flutter* (aleteo por precesión), originado por el acoplamiento dinámico entre las vibraciones estructurales del ala, los motores y las cargas aerodinámicas. Estos sucesos impulsaron el desarrollo de la aeroelasticidad moderna y motivaron la necesidad de comprender y predecir los umbrales de velocidad a partir de los cuales las estructuras sometidas a flujo pierden estabilidad [7].

Desde entonces surgió el interés por determinar las velocidades del viento a partir de las cuales las banderas se desestabilizan, conocidas como velocidades críticas [1,8]. El estudio de estas velocidades no solo tiene interés teórico, sino también importancia práctica, ya que conocer la

velocidad a la cual aparecen los mecanismos de inestabilidad conocidos como divergencia y aleteo ayuda a prevenir fallas estructurales y a mejorar el diseño de sistemas expuestos a flujos de aire.

Las placas flexibles se utilizan con frecuencia como modelos simplificados basados en la teoría de Euler–Bernoulli para el estudio de fenómenos de inestabilidad en flujo axial. Su comportamiento resulta de la competencia entre las fuerzas aerodinámicas inducidas por el flujo, que tienden a desestabilizar la estructura, y su rigidez a flexión, que actúa como mecanismo restaurador. A bajas velocidades, la rigidez domina y la configuración de equilibrio se mantiene estable. Sin embargo, al superar una velocidad crítica, las fuerzas aerodinámicas pueden inducir la pérdida de estabilidad. Dependiendo de los parámetros del sistema, esta transición puede manifestarse como una deformación estática creciente (divergencia) o como oscilaciones autoexcitadas (aleteo).

Un trabajo teórico importante sobre el análisis del aleteo de placas con diferentes condiciones de frontera fue desarrollado por Guo y Païdoussis [1]. En dicho trabajo se asume que la placa se encuentra inmersa en un canal rectangular en el que circula un flujo potencial bidimensional. Dicha placa se modela unidimensional, considerando su ancho infinito. La ecuación de movimiento se formula en el espacio de Fourier y se resuelve mediante el método de Galerkin. Uno de los aspectos más relevantes de este estudio es el tratamiento de las condiciones de frontera en la interacción fluido–placa, ya que estas determinan la distribución de presiones inducidas por el flujo y, en consecuencia, la aparición de distintos mecanismos de inestabilidad.

El trabajo de Eloy et al. [2] puede interpretarse como una extensión directa del modelo de Guo y Païdoussis [1], ya que considera un flujo potencial tridimensional capturando el efecto del ancho finito de la placa y describiendo de manera más realista la dinámica de interacción entre el fluido y la placa. En este enfoque, aunque los modos de aleteo se consideran bidimensionales, el cálculo de la presión alrededor de la placa se realiza en tres dimensiones. Esto permite estudiar cómo la razón de aspecto de la placa modifica los umbrales de inestabilidad y muestra que una placa de ancho finito puede comportarse de manera distinta a una placa idealizada de ancho infinito.

El análisis de estas configuraciones también es relevante porque las condiciones de frontera modifican de forma considerable la respuesta dinámica de la placa. Una misma estructura flexible puede presentar distintos umbrales en la de pérdida de estabilidad dependiendo de si sus extremos se encuentran empotrados, articulados o libres. Por ello, estudiar configuraciones específicas no es solamente un cambio geométrico o matemático, sino una forma de identificar cómo las restricciones mecánicas alteran el acoplamiento entre los modos de vibración de la placa y la presión inducida por el flujo.

En el presente trabajo nos interesa estudiar la inestabilidad de una placa inmersa en un flujo de aire axial bajo condiciones de frontera articulada–libre, utilizando la teoría desarrollada por Eloy et al. [2]. Si bien este problema ha sido estudiado previamente dentro del contexto general de placas flexibles en flujo axial, la configuración articulada–libre ha recibido menor atención en comparación con la configuración empotrada–libre. Por esta razón, se busca analizar el comportamiento de los primeros modos de vibración y determinar los umbrales de velocidad asociados a la aparición de divergencia y aleteo para esta condición de frontera.

TEORÍA

Para analizar la interacción entre el fluido y la placa y estudiar su inestabilidad, se considera una placa rectangular y elástica, de longitud $\boldsymbol{\ell}$ y ancho $\boldsymbol{h}$, ubicada en el plano $\boldsymbol{xz}$ como se muestra en la Figura 1. La deflexión de la placa, $\boldsymbol{y(x,t)}$, ocurre a lo largo del eje $\boldsymbol{y}$, perpendicular al plano $\boldsymbol{xz}$ de la placa, y depende solo de la coordenada $\boldsymbol{x}$ y el tiempo $\boldsymbol{t}$. La placa está sometida a un flujo de aire de velocidad $\boldsymbol{v}$ en la dirección $\boldsymbol{x}$.

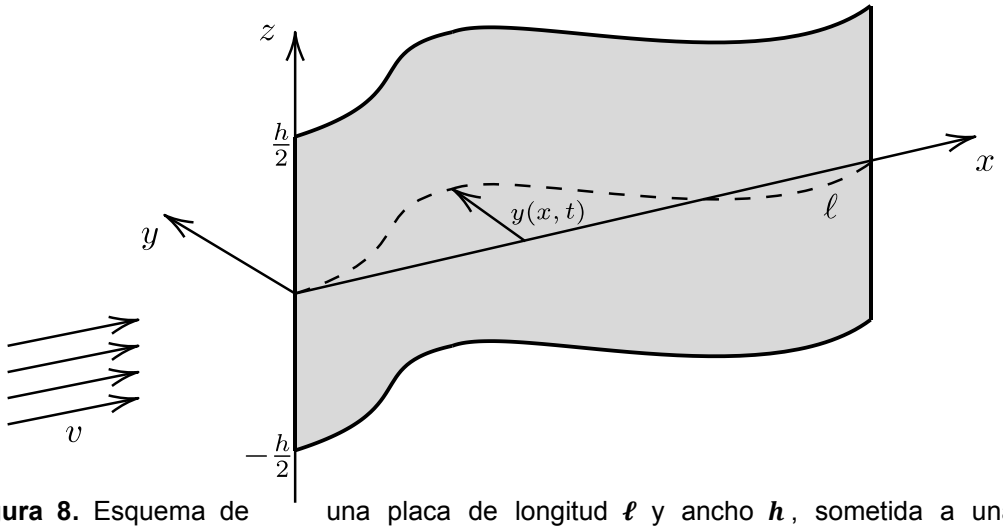


Figura 8. Esquema de una placa de longitud $\boldsymbol{\ell}$ y ancho $\boldsymbol{h}$, sometida a una deflexión bidimensional $\boldsymbol{y(x,t)}$ debido a un flujo de aire de velocidad $\boldsymbol{v}$ en la dirección del eje $\boldsymbol{x}$.

Bajo estas condiciones, la ecuación de movimiento de la placa se expresa como

$$\boldsymbol{\rho_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \langle \Delta p \rangle_z,} \tag{1}$$

donde $\boldsymbol{\rho_p}$ es la densidad superficial de la placa, $\boldsymbol{D = \frac{E h_p^3}{12(1-\nu^2)}}$ denota la rigidez de la placa, siendo $\boldsymbol{E}$ el módulo de Young, $\boldsymbol{h_p}$ el espesor de la placa y $\boldsymbol{\nu}$ el coeficiente de Poisson; $\boldsymbol{\Delta p}$ es la diferencia de presión entre ambos lados de la placa y el operador $\langle \cdot \rangle_z$ representa el promedio a lo largo del eje $\boldsymbol{z}$, es decir:

$$\boldsymbol{\langle \Delta p \rangle_z = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \Delta p(x,z,t)\, dz.} \tag{2}$$

La ecuación (1) se adimensionaliza usando $\boldsymbol{\ell}$ como longitud característica y $\boldsymbol{v}$ como velocidad característica, definiendo

$$\boldsymbol{x' = \frac{x}{\ell}, \quad y' = \frac{y}{\ell}, \quad z' = \frac{z}{\ell}, \quad t' = \frac{tv}{\ell}.} \tag{3}$$

Para mayor claridad, a partir de ahora se omitirá el acento primado en las variables adimensionales. De este modo, la ecuación de movimiento (1) se expresa en su forma adimensional como:

$$\boldsymbol{\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{1}{U^2} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = M \langle p \rangle_z,} \tag{4}$$

donde $\boldsymbol{p}$ es la presión adimensional, $\boldsymbol{U}$ la velocidad del flujo reducida y $\boldsymbol{M}$ es la razón de masa dadas por

$$\boldsymbol{p = -\frac{2\Delta p}{\rho_a U^2} \quad , \quad U = \sqrt{\frac{\rho_p}{D}} \ell v \quad , \quad M = \frac{\rho_a \ell}{\rho_p},} \tag{5}$$

con $\boldsymbol{\rho_a}$ la densidad del fluido del aire.

La dinámica de la placa queda completamente determinada por tres parámetros adimensionales: $\boldsymbol{U}$, $\boldsymbol{M}$, y $\boldsymbol{H}$, donde $\boldsymbol{H}$ se define como la relación de aspecto entre el ancho $\boldsymbol{h}$ y el largo $\boldsymbol{\ell}$ de la palca, respectivamente, es decir,

$$\boldsymbol{H = \frac{h}{\ell}.} \tag{6}$$

Expansión de Galerkin

Se considera una expansión de Galerkin para la deflexión de la placa $\boldsymbol{y(x,t)}$, que se expresa como

$$\boldsymbol{y(x,t) = \sum_{n=1}^{N} A_n y_n(x) e^{i\omega t} + c.c,} \tag{7}$$

Donde $\boldsymbol{c.c.}$ denota el conjugado complejo, $\boldsymbol{\omega}$ es la frecuencia angular adimensionalizada y $\boldsymbol{A_n}$ son las amplitudes a determinar. En esta ecuación las funciones $\boldsymbol{y_n(x)}$ representan los modos normales de vibración de la placa sometida a flexión y son soluciones de la siguiente ecuación diferencial

$$\boldsymbol{\frac{d^4 y_n}{dx^4} = k_n^4 y_n,} \tag{8}$$

siendo $\boldsymbol{k_n}$ los números de onda adimensionalizados.

Para el caso de una placa con condiciones de frontera articulada-libre, los modos normales de vibración se expresan como [9]:

$$\boldsymbol{y_n(x) = D\left[\sin(k_n x) + \frac{\sin(k_n)}{\sinh(k_n)}\sinh(k_n x)\right],} \tag{9}$$

donde $\boldsymbol{D}$ es una constante de normalización, y $\boldsymbol{k_n}$ se determina al resolver numéricamente la ecuación trascendental

$$\boldsymbol{\tanh(k_n) = \tan(k_n).} \tag{10}$$

A diferencia del caso empotrado-libre, se omite el caso $\boldsymbol{n = 1}$ ya que corresponde a una rotación sólida de la placa alrededor de su eje en $\boldsymbol{x = 0}$, por lo que, en este caso, el primer modo corresponde a $\boldsymbol{n = 2}$ y el segundo a $\boldsymbol{n = 3}$.

Condiciones de frontera fluido-placa

La placa inmersa en un flujo de aire perturba el campo de velocidad. En consecuencia, la velocidad total del sistema puede escribirse como $\boldsymbol{V = v\hat{\imath} + \vec{\xi}}$, donde $\boldsymbol{\vec{\xi}}$ es la velocidad de perturbación. Suponemos que el flujo es no viscoso e irrotacional, de tal manera que la presión de perturbación se obtiene de la ecuación no estacionaria de Bernoulli:

$$\boldsymbol{p_n = 2\left(\frac{\partial \varphi_n}{\partial t} + \frac{\partial \varphi_n}{\partial x}\right)_{y=0},} \tag{11}$$

donde $\boldsymbol{\varphi_n(x,y,z)}$ es el potencial de perturbación para cada modo $\boldsymbol{n}$, el cual satisface la ecuación de Laplace:

$$\boldsymbol{\frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_n}{\partial z^2} = 0,} \tag{12}$$

junto a las siguientes condiciones de frontera:

Lejos de la placa la perturbación del flujo desaparece:

$$\boldsymbol{\varphi_{n|_{x\to\pm\infty}} = \varphi_{n|_{y\to\infty}} = \varphi_{n|_{z\to\pm\infty}} = 0.} \tag{13}$$

La velocidad normal del fluido sobre la placa debe ser igual a la velocidad normal de la superficie de la placa:

$$\left.\frac{\partial \varphi_n}{\partial y}\right|_{y=0} = \frac{\partial y_n}{\partial t} + \frac{\partial y_n}{\partial x}, \quad \text{para} \quad (x,z) \in \mathbb{D}. \tag{14}$$

Finalmente, se establece que fuera del dominio de la placa, la presión es nula:

$$p_n = 0, \quad \text{para} \quad (x,z) \notin \mathbb{D}. \tag{15}$$

donde $\mathbb{D}$ es el domino de la placa:

$$\mathbb{D} = \left\{(x,z): x \in [0,1] \text{ y } z \in \left[-\frac{H}{2}, \frac{H}{2}\right]\right\}. \tag{16}$$

Cálculo de la presión

Para determinar la presión de perturbación a lo ancho y largo de la placa, se resuelven las ecuaciones (11)-(15) en el espacio de Fourier. Se obtienen dos ecuaciones integrales singulares que se calculan numéricamente utilizando el método de Erdogan and Gupta [10].

Presión a lo largo de z en función de $\overline{k}_x$

La ecuación integral singular que debe resolverse en función del número de onda $\overline{k}_x$ es la siguiente:

$$\int_{-1}^{1} \overline{p}_n'(\overline{v}) F\left(\overline{k}_x(\overline{z}-\overline{v})\right) d\overline{v} = \pi, \quad \text{para} \quad \overline{z} \in [-1,1] \tag{17}$$

donde

$$F(X) = \int_0^\infty \sqrt{1+\frac{1}{\alpha^2}}\,\mathrm{sin}(\alpha X)\, d\alpha. \tag{18}$$

El promedio de la presión a lo largo del ancho se puede aproximar como en [2], de la siguiente forma:

$$\langle \overline{p} \rangle_{\overline{z}} \approx 1 - \frac{1}{2\overline{k}_x + \exp\left[(\pi/4-2)\overline{k}_x\right]}. \tag{19}$$

El procedimiento detallado para el cálculo de la ecuación integral (17) puede consultarse en el artículo de Eloy et al. [2].

Presión a lo largo de x

La presión a lo largo de x se obtiene al resolver la siguiente ecuación integral:

$$\frac{1}{4\pi}\int_0^1 \langle p_n'(u,z)\rangle_z\, G(x-u,H)\, du = -\omega^2 y_n + 2i\omega\frac{dy_n}{dx} + \frac{d^2 y_n}{dx^2}, \tag{20}$$

donde

$$G(X,H) \approx -\frac{2}{X} - \left(\frac{8}{H} - \frac{8-\pi}{H+2|X|}\right)\mathrm{sgn}(X). \tag{21}$$

Luego, el promedio de la presión a lo largo de x se expresa de la siguiente forma:

$$\langle \boldsymbol{p_n} \rangle_{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{x}) = -\boldsymbol{\omega^2 p_n^{(M)}}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{2i\omega p_n^{(G)}}(\boldsymbol{x}) + \boldsymbol{p_n^{(K)}}(\boldsymbol{x}), \tag{22}$$

donde $\boldsymbol{p_n^{(M)}}(\boldsymbol{x})$, $\boldsymbol{p_n^{(G)}}(\boldsymbol{x})$ y $\boldsymbol{p_n^{(K)}}(\boldsymbol{x})$ se obtienen resolviendo la ecuación (20) suprimiendo los términos $\boldsymbol{y_n}$, $\frac{\boldsymbol{dy_n}}{\boldsymbol{dx}}$ y $\frac{\boldsymbol{d^2y_n}}{\boldsymbol{dx^2}}$.

Método de Galerkin

Una vez determinada la diferencia de presión $\langle \boldsymbol{\Delta p} \rangle_{\boldsymbol{z}}$ asociada a cada modo $\boldsymbol{y_n}(\boldsymbol{x})$, la ecuación de movimiento dada en (4) puede resolverse mediante el método de Galerkin:

$$\int_0^1 \sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{A_n} \left(-\boldsymbol{\omega^2 y_n}(\boldsymbol{x}) + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{U^2}} \boldsymbol{y_n^{(iv)}}(\boldsymbol{x}) - \boldsymbol{M} \langle \boldsymbol{p_n} \rangle_{\boldsymbol{z}}(\boldsymbol{x}) \right) \boldsymbol{y_m}(\boldsymbol{x})\ \boldsymbol{dx} = \boldsymbol{0}, \quad \boldsymbol{m} = \boldsymbol{1, 2, 3, \dots, N} \tag{23}$$

lo que conduce a

$$\sum_{n=1}^{N} \left[\left(-\boldsymbol{\omega^2} + \frac{\boldsymbol{k_n^4}}{\boldsymbol{U^2}} \right) \boldsymbol{\delta_{nm}} - \boldsymbol{M P_{nm}}(\boldsymbol{\omega}) \right] \boldsymbol{A_n} = \boldsymbol{0}, \qquad \boldsymbol{m} = \boldsymbol{1, 2, 3, \dots, N} \tag{24}$$

donde

$$\boldsymbol{\delta_{nm}} = \int_0^1 \boldsymbol{y_n}(\boldsymbol{x}) \boldsymbol{y_m}(\boldsymbol{x})\ \boldsymbol{dx} = \begin{cases} \boldsymbol{1}, \text{ si } \boldsymbol{n = m} \\ \boldsymbol{0}, \text{ si } \boldsymbol{n \neq m} \end{cases}, \quad \boldsymbol{P_{nm}}(\boldsymbol{\omega}) = \int_0^1 \langle \boldsymbol{p_n} \rangle_{\boldsymbol{z}}\ \boldsymbol{y_m}(\boldsymbol{x})\, \boldsymbol{dx}. \tag{25}$$

Para garantizar la existencia de soluciones no triviales, se impone que el determinante del sistema anterior sea nulo, es decir,

$$\boldsymbol{\det} \left(-\boldsymbol{\omega^2 I} + \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{U^2}} \boldsymbol{Q} - \boldsymbol{MP} \right) = \boldsymbol{0} \tag{26}$$

Donde $\boldsymbol{I}$ representa la matriz identidad, $\boldsymbol{Q}$ es una matriz diagonal cuyas entradas corresponden a los números de onda $\boldsymbol{k_n^4}$ ordenados de forma ascendente sobre su diagonal, y $\boldsymbol{P}$ es la matriz que depende de $\boldsymbol{\omega}$.

De este modo, para una relación de masa $\boldsymbol{M}$, la determinación de la estabilidad al aleteo de la placa requiere calcular la matriz $\boldsymbol{P}$ y encontrar la velocidad $\boldsymbol{U}$ para la cual al menos un modo presenta una tasa de crecimiento positiva. Aquí se ha considerado $\boldsymbol{\omega = \omega_R + i\omega_I}$, donde $\boldsymbol{\omega_R}$ y $\boldsymbol{\omega_I}$ corresponden a la parte real y a la parte imaginaria de la frecuencia, respectivamente, de modo que la inestabilidad ocurre cuando $\boldsymbol{\omega_I > 0}$.

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra la presión promedio a lo largo del ancho, calculada a partir de la ecuación (19), que depende únicamente del número de onda adimensional $\boldsymbol{\bar{k}_x}$. Para valores pequeños de $\boldsymbol{\bar{k}_x}$, correspondientes a ondas de baja frecuencia o longitudes de onda largas, la presión promedio aumenta de manera aproximadamente lineal. En cambio, para valores grandes de $\boldsymbol{\bar{k}_x}$, asociados a ondas de alta frecuencia o longitudes de onda cortas, la presión tiende a un valor constante. Este comportamiento refleja cómo la interacción entre el fluido y la placa varía según la escala espacial de las perturbaciones.

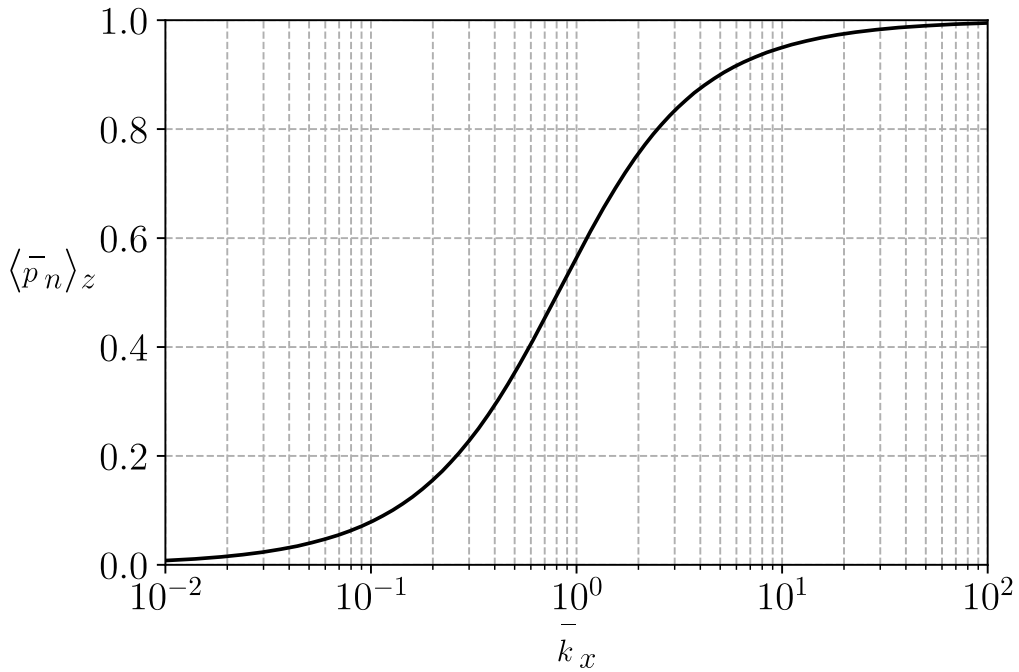


Figura 2. Promedio de la presión $\langle \bar{p} \rangle_{\bar{z}}$ en función del número de onda adimensional $\bar{k}_x$.

Las Figuras 3 y 4 muestran, respectivamente, la evolución de las frecuencias real e imaginaria para los modos 1 y 2 de una placa rectangular sometida a un flujo axial, para dos configuraciones: articulada-libre (líneas negras continuas) y empotrada-libre (línea azul discontinua), considerando $\boldsymbol{H = 1.0}$ y $\boldsymbol{M = 1.0}$.

Para la configuración articulada-libre, se observa que la frecuencia real del primer modo de vibración disminuye a medida que aumenta la velocidad del viento, hasta alcanzar un valor nulo, lo que corresponde a una deflexión estática de la placa. Al incrementarse aún más la velocidad, la parte imaginaria del primer modo cambia de signo, indicando la aparición de una inestabilidad de tipo divergencia en $\boldsymbol{U = 6.8}$. Para velocidades mayores, la parte imaginaria del segundo modo cruza por cero en $\boldsymbol{U = 13.2}$, mientras que la parte real permanece distinta de cero, lo que corresponde a una inestabilidad de tipo aleteo.

En comparación con la configuración articulada–libre, la configuración empotrada–libre también presenta una disminución de la frecuencia real del primer modo a medida que aumenta la velocidad del viento. Sin embargo, la inestabilidad por aleteo solo aparece en el segundo modo, ya que la parte imaginaria asociada al primer modo no llega a desarrollarse. Además, para el caso estudiado, la velocidad crítica de la configuración empotrada–libre es menor que la de la configuración articulada–libre, alcanzándose en $\boldsymbol{U = 7.2}$. En ambas configuraciones, la pérdida de estabilidad ocurre a través del segundo modo debido al fenómeno de aleteo.

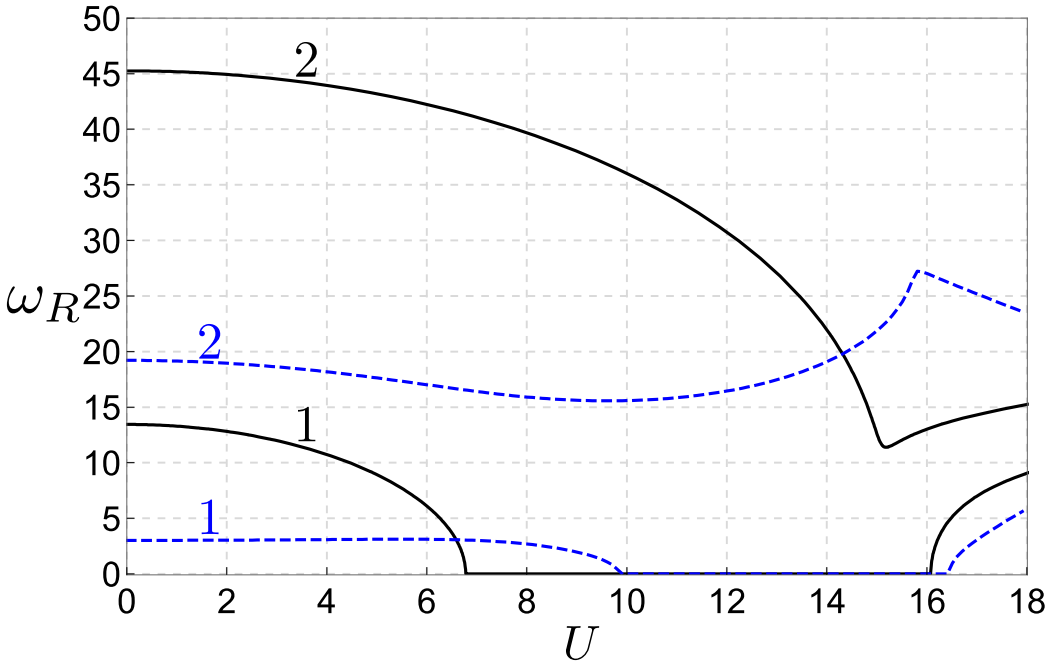


Figura 3. Evolución de la frecuencia real (ω_I) en función de la velocidad (U) para los modos 1 y 2 en las configuraciones articulada-libre (línea negra continua) y empotrada-libre (línea azul discontinua).

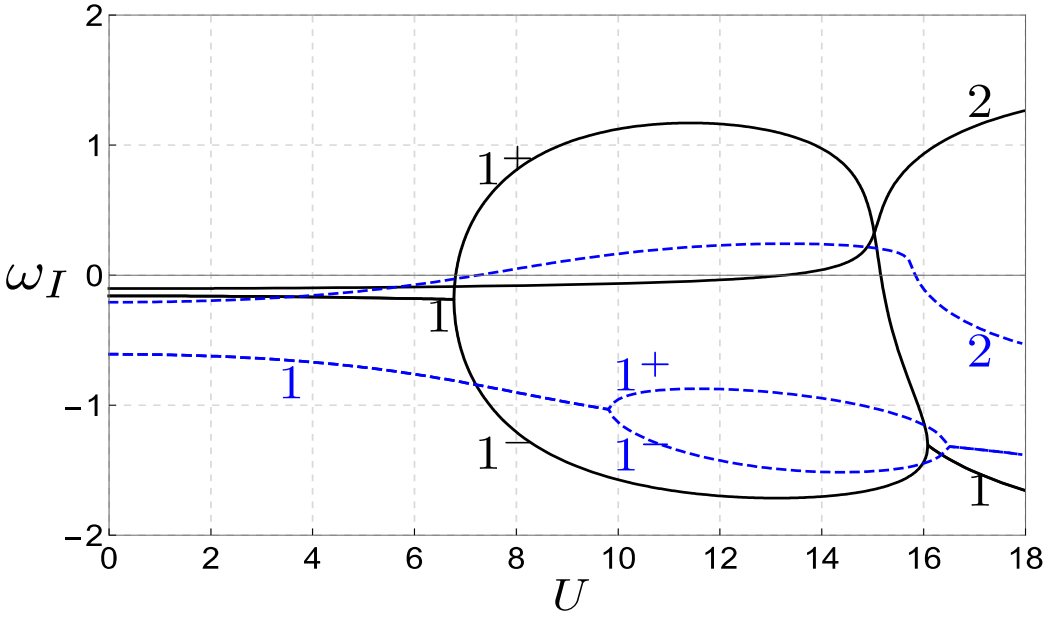


Figura 4. Evolución de la frecuencia imaginaria (ω_I) en función de la velocidad (U) para los modos 1 y 2 en las configuraciones articulada-libre (línea negra continua) y empotrada-libre (línea azul discontinua).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis teórico de la estabilidad de una placa rectangular elástica inmersa en un flujo de aire axial, bajo la condición de frontera articulada-libre. Para ello, se emplea la metodología propuesta por Eloy et al. [2] para calcular la diferencia de presión entre ambas caras de la placa en el espacio de Fourier. Al adimensionalizar la ecuación de movimiento se observa que el sistema depende de tres parámetros: la relación de aspecto ($\boldsymbol{H}$), la razón de masa ($\boldsymbol{M}$) y una velocidad adimensional ($\boldsymbol{U}$). Posteriormente, la ecuación de movimiento de la placa se formula en el espacio de Fourier y se resuelve mediante el método de Galerkin, lo que permite transformar el problema en un sistema de ecuaciones cuya solución conduce a la obtención de las frecuencias del sistema y a la identificación de los fenómenos de inestabilidad asociados a los distintos modos de vibración.

Los resultados muestran que, para la configuración articulada-libre, el sistema presenta inicialmente una inestabilidad de tipo divergencia asociada al modo 1 alrededor de $\boldsymbol{U = 6.8}$, mientras que el fenómeno de aleteo aparece en el modo 2 cuando la velocidad del flujo alcanza aproximadamente $\boldsymbol{U = 13.2}$. En contraste, para la configuración empotrada-libre no se observa la aparición de divergencia, mientras que el aleteo ocurre a una velocidad crítica menor, aproximadamente en $\boldsymbol{U = 7.2}$. Esto indica que las placas con condición empotrada-libre presentan una mayor tendencia a la inestabilidad que las placas articulada-libre. Cabe destacar que, en ambas configuraciones, el fenómeno de aleteo se manifiesta en el modo 2, siendo este el modo que finalmente se desestabiliza.

BIBLIOGRAFÍA

1. C. Q. Guo and M. P. Païdoussis, “Stability of rectangular plates with free side-edges in two-dimensional inviscid channel flow”, Journal of Applied Mechanics 67, 171–176 (2000).
2. C. Eloy, C. Souilliez and L. Schouveiler, “Flutter of a rectangular plate”, *Journal of Fluids and Structures* 23, 904–919 (2007).
3. Z. Pang, L. B. Jia and X. Z. Yin, “Flutter instability of rectangle and trapezoid flags in uniform flow”, Physics of Fluids 22, 121701 (2010).
4. L. Rayleigh, “On the instability of jets”, Proceedings of the London Mathematical Society 1, 4–13 (1878).
5. R. A. Fairthorne, “Drag of flags”, Aeronautical Research Committee Reports and Memoranda 1345, 887–891 (1930).
6. K. Peters, “Flatterschwingungen von Überfallstrahlen und Fahnen”, Verlag von R. Oldenbourg (1940).
7. D. H. Hodges and G. A. Pierce, Introduction to Structural Dynamics and Aeroelasticity, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 2011).
8. M. J. Shelley and J. Zhang, “Flapping and bending bodies interacting with fluid flows”, Annual Review of Fluid Mechanics 43, 449–465 (2011).
9. S. S. Rao, D. Sepúlveda García, R. Rodríguez Figueroa and G. del Valle Díaz Muñoz, Vibraciones mecánicas, Pearson Educación (2012).
10. F. Erdogan and G. D. Gupta, “On the numerical solution of singular integral equations”, Quarterly of Applied Mathematics 29, 525–534 (1972).

DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN ESPECTRÓMETRO VIS-NIR PARA SU USO EN DOCENCIA

Benjamín Edgardo Gómez Medina, Diana Laura Martínez Molina, Edna Maria Medina Morón, Alan Iván Reyes Briones, Ricardo Chapa García, Romeo de Jesús Selvas Aguilar

Universidad Autónoma De Nuevo León
benjamin02621@gmail.com

RESUMEN

El trabajo presenta el diseño, desarrollo y validación experimental de un espectrómetro VIS–NIR de bajo costo, destinado a la caracterización de fibras ópticas. El sistema está orientado a aplicaciones en investigación y entornos universitarios donde se requiere información espectral en la región del visible e infrarrojo cercano. Se empleó una fuente de luz blanca acoplada a fibra óptica como señal de entrada, junto con una rejilla de difracción, un sensor CCD lineal y un microcontrolador Arduino GIGA R1 para la adquisición y transmisión de datos hacia una aplicación web desarrollada específicamente para este fin. El arreglo experimental requirió la alineación precisa de los componentes ópticos para garantizar una adecuada captura de la señal y su visualización en tiempo real. El sistema integra una configuración óptica compacta con electrónica personalizada y control embebido, permitiendo un funcionamiento estable y eficiente, así como el monitoreo remoto, almacenamiento y procesamiento básico de los datos espectrales, incluyendo normalización e identificación de picos. El desempeño del sistema se evaluó mediante la caracterización de una fibra dopada con iterbio (Yb^{3+}) de aproximadamente 400 ppm y estructura de doble revestimiento, identificándose picos de absorción alrededor de 915 nm y 975 nm, en concordancia con la literatura[1]. El espectrómetro presentó un rango operativo de 400 a 1000 nm y una resolución aproximada de 4 nm, suficiente para discriminar las características espectrales de interés. Las mediciones mostraron buena reproducibilidad, evidenciada en la estabilidad de la posición e intensidad relativa de los picos, así como una relación señal–ruido adecuado que permitió la identificación directa sin procesamiento avanzado, lo cual confirma la capacidad del sistema para resolver firmas espectrales relevantes en fibras ópticas. No obstante, se observaron limitaciones en la sensibilidad en la región infrarroja, atribuibles a las características del sensor CCD implementado. Finalmente, se demuestra que el espectrómetro desarrollado constituye una herramienta confiable, versátil y de bajo costo para aplicaciones en fotónica experimental y entornos educativos, con potencial de mejora en su extensión espectral y sensibilidad.

INTRODUCCIÓN

La espectroscopía óptica es una técnica importante en la física experimental, la óptica y la fotónica, ya que permite analizar la intensidad de la luz en función de su longitud de onda. Con ella es posible identificar picos de emisión, absorción y variaciones espectrales asociadas a materiales, fuentes luminosas o dispositivos ópticos. También es fundamental para caracterizar láseres, sensores y fibras ópticas.

En las fibras dopadas, como las de iterbio, permite estudiar procesos de absorción de energía y emisión en el infrarrojo cercano, los cuales son relevantes en láseres de fibra y sistemas de amplificación en óptica. Sin embargo, este tipo de análisis suele requerir equipos comerciales especializados, como los analizadores de espectro óptico, que ofrecen alta resolución y sensibilidad, pero tienen un costo elevado. Esto limita su uso en laboratorios educativos o proyectos con recursos reducidos.

Por ello, este proyecto propone desarrollar un espectrómetro de fibra óptica de bajo costo, fabricado mediante impresión 3D y componentes accesibles como lentes, una rejilla de difracción y un sensor CCD lineal. Su objetivo es visualizar señales espectrales y caracterizar parcialmente una fibra dopada de iterbio, contribuyendo a la enseñanza experimental de la óptica, la fotónica y la instrumentación científica.

TEORÍA

La espectroscopía óptica es una técnica experimental que permite estudiar la distribución de intensidad de una fuente luminosa en función de la longitud de onda. Mediante esta técnica es posible identificar picos de emisión, absorción o transmisión asociados a diferentes fuentes de luz, materiales o sistemas ópticos. En el área de la fotónica, la espectroscopía es una herramienta fundamental para la caracterización de fibras ópticas, fuentes láser, materiales dopados y dispositivos optoelectrónicos.

Un espectrómetro óptico tiene como función separar las diferentes componentes espectrales de una señal luminosa y registrar su intensidad. De manera general, la luz proveniente de una fuente o fibra óptica ingresa al sistema, es colimada mediante una lente, dispersada por una rejilla de difracción y posteriormente enfocada sobre un detector. Debido a que cada longitud de onda se desvía hacia una posición distinta, es posible reconstruir el espectro a partir de la señal registrada por el sensor.

El principio físico principal de un espectrómetro basado en rejilla es la difracción. Una rejilla de difracción está formada por líneas periódicas que producen interferencia constructiva en determinadas direcciones. La relación entre la longitud de onda y el ángulo de difracción puede describirse mediante la ecuación de la rejilla:

$$\mathbf{m\lambda = d(sen\theta_i + sen\theta_m)} \quad (1)$$

donde m es el orden de difracción, λ es la longitud de onda, d es la separación entre líneas de la rejilla, θ_i es el ángulo de incidencia y θ_m es el ángulo de difracción. Esta ecuación permite explicar cómo las distintas longitudes de onda son separadas espacialmente antes de llegar al detector.

La detección de la señal espectral puede realizarse mediante sensores lineales, como los sensores CCD. Un sensor CCD lineal está compuesto por una serie de píxeles distribuidos en una sola dimensión, donde cada píxel convierte la intensidad luminosa incidente en una señal eléctrica proporcional. Cuando el espectro dispersado incide sobre el detector, cada píxel registra una región distinta del espectro, por lo que la señal obtenida inicialmente corresponde a una intensidad en función de la posición del píxel.

Para convertir la posición de los píxeles en valores de longitud de onda se requiere una calibración espectral. Esta calibración consiste en relacionar el número de píxel con una longitud de onda conocida, generalmente utilizando fuentes monocromáticas de referencia. De forma aproximada, esta relación puede expresarse mediante una ecuación lineal:

$$\mathbf{\lambda = aP + b} \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda, P es el número de píxel, a representa la pendiente de calibración o resolución aproximada del sistema, y b corresponde al ajuste inicial de la escala espectral.

La resolución espectral indica la capacidad de un espectrómetro para distinguir variaciones pequeñas en longitud de onda. Una mejor resolución permite separar picos cercanos y realizar mediciones más precisas, mientras que una resolución más limitada permite identificar picos principales y tendencias generales, pero dificulta detectar pequeños desplazamientos espectrales.

Las fibras dopadas con iterbio contienen iones Yb^{3+} incorporados en el núcleo de la fibra óptica. Estos iones pueden absorber energía de un diodo láser de bombeo y emitir radiación en la región del infrarrojo cercano. Debido a estas propiedades, las fibras dopadas con iterbio son ampliamente utilizadas en láseres de fibra, amplificadores ópticos y sistemas fotónicos.

Finalmente, el desempeño de un espectrómetro VIS–NIR depende de la responsividad del detector. La responsividad describe la eficiencia con la que un sensor convierte la luz incidente en señal eléctrica para diferentes longitudes de onda. Como esta respuesta no es uniforme en todo el

espectro, algunos detectores presentan mejor sensibilidad en el rango visible y menor respuesta en el infrarrojo cercano, lo cual puede afectar la intensidad registrada y la precisión en la identificación de picos espectrales.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales

Componentes electrónicos y de adquisición de datos

- 1 Arduino GIGA R1 WiFi
- 1 GIGA Display
- 1 sensor CCD lineal TSL1401CL
- 5 cables Dupont macho-hembra
- 1 cable USB-C

Componentes ópticos del espectrómetro

- 1 rejilla de difracción de 50 × 50 mm, 600 líneas/mm
- 1 lente biconvexa de 40 mm de diámetro, con distancia focal de 11.5 cm
- 1 lente biconvexa de 39 mm de diámetro, con distancia focal de 7 cm
- 1 ranura lineal de 0.02 mm de abertura
- 1 colimador FC de 11.85 mm de diámetro
- 1 adaptador FC-FC de 1.5 × 1.5 cm

Fibras ópticas y conectores

- 1 fibra FC-FC multimodal interna de 1 m de largo, 62.5 µm/125 µm
- 1 fibra FC-FC multimodal externa de 3 m de largo, 62.5 µm/125 µm
- 1 fibra FC-SMA multimodal para la OSA Ocean Optics
- 1 pigtail con entrada FC
- 1 fibra multimodal de doble revestimiento de 6 µm/100 µm
- 1 fibra dopada con iterbio de 1020–1080 nm

Fuentes de luz y sistema de bombeo

- 1 diodo láser PLD-6 de 950–980 nm
- 1 controlador de diodo láser de alta potencia
- 1 probador de fibra óptica rojo de 659 nm
- 1 probador de fibra óptica verde de 510 nm

Materiales de montaje y fabricación

- 2 bases montables estándar para mesa óptica
- 4 tornillos M6
- 1 tornillo M2
- 10 tornillos M3
- 10 tuercas M3
- 2 placas de aluminio
- 1 cabina de aluminio
- 1 platillo de aluminio
- Filamento PLA
- Resina epoxi negra mate

Equipos de fabricación y preparación de fibra

- Impresora 3D de filamento Anycubic Kobra 3 Max
- Impresora 3D de resina Anycubic Photon Mono 4
- 1 empalmadora de fibras ópticas
- 1 cortadora de fibras ópticas
- 1 pelador de fibras ópticas
- Vernier digital

Equipos de medición y análisis

- 1 medidor de potencia óptica
- Analizador de espectros ópticos Anritsu
- Analizador de espectros ópticos Ocean Optics
- 1 cámara web sin filtro IR

Materiales de limpieza

- Alcohol isopropílico
- Servilletas quirúrgicas

Software utilizado

- Arduino IDE
- IntelliJ IDEA
- Onshape

Procedimiento

El desarrollo experimental del espectrómetro se llevó a cabo mediante una metodología progresiva, orientada a la construcción, calibración y validación de un sistema optoelectrónico para la caracterización espectral de una fibra dopada con iterbio, por lo que el procedimiento para su realización fue constituido por 5 etapas: (1) Diseño e impresión de las piezas en 3D, (2) Montaje experimental del sistema optoelectrónico, (3) Calibración del sistema mediante fuentes de luz visible, (4) Fijación del sistema optoelectrónico en un módulo interno, (5) Montaje experimental y validación para la caracterización de la fibra dopada con iterbio $\mathbf{YB}^{+3}$.

Diseño e impresión de las piezas en 3D.

El diseño se realizó en el software Onshape, accesible mediante licencia de estudiante vía navegador. Se imprimieron en filamento PLA seis componentes principales para un riel de 35 cm que permite el desplazamiento libre en el eje Y para ajuste de distancias durante la calibración.
Cada pieza se diseñó con una altura estándar de 30 mm, determinada por la posición de proyección del haz del colimador, de modo que todas las componentes quedaran alineadas en el camino óptico. Los componentes fueron:

- Colimador (11.85 mm de diámetro): La base consta de una pieza fija y una tapa extraíble que sujetan el colimador mediante dos pestañas con roscas M3. Es la única pieza que no se mueve, sirviendo como referencia de posición del haz.

- Ranura lineal: La base se imprimió en PLA, pero la pieza con la abertura se fabricó en resina negra mate, logrando una apertura mínima de 0.02 mm. Esto fue necesario porque la impresora de filamento PLA solo alcanzaba 0.05 mm como mínimo, insuficiente dada la capacidad milimétrica de los fotodetectores del sensor.

- Lente biconvexa de 39 mm: Pieza de 73 mm de largo extremo a extremo, con dos pestañas de 10 mm y roscas M3 para fijación.
- Lente biconvexa de 40 mm: Pieza de 71 mm de largo con pestañas de 6 mm y roscas M3.
- Rejilla de difracción (600 líneas/mm, 50×50 mm): La pieza tiene 54×54 mm con una cara abierta para insertar y retirar la rejilla, centrada respecto al haz incidente.
- Sensor CCD lineal TSL1401CL: Pieza de 56.50 mm de altura y 50 mm de base, con 4 roscas M3 para sujetar el sensor evitando que colisione con su potenciómetro trasero, y 4 roscas M6 para montarlo sobre una pieza tipo riel que permite movimiento libre en el eje X.

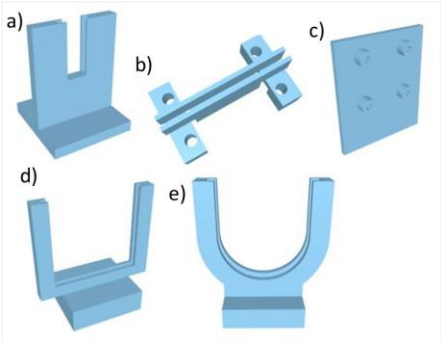


Figura 1. Diseño de las piezas del sistema optoelectrónico:
a) Pieza ranura, b) Pieza base sensor, c) Pieza sensor, d) Pieza rejilla, e) Pieza primera lente.

Para la carcasa se diseñaron tres secciones acoplables. La sección frontal aloja el Arduino GIGA R1 Wi-Fi y la pantalla GIGA Display en una abertura de 10×6 cm, con un patrón de roscas M6 en la superficie que simula una mesa óptica. La sección trasera incorpora el adaptador FC-FC de 1.5×1.5 cm fijado con un tornillo M2, con el mismo patrón de roscas M6 para compatibilidad. Al unir ambas secciones con dos bases montables estándar y tornillos M6, y cubrirlas con una capucha, se obtiene la carcasa final de 40.5 cm de base y 14.5 cm de altura, diseñada para aislar el sistema de luz exterior.

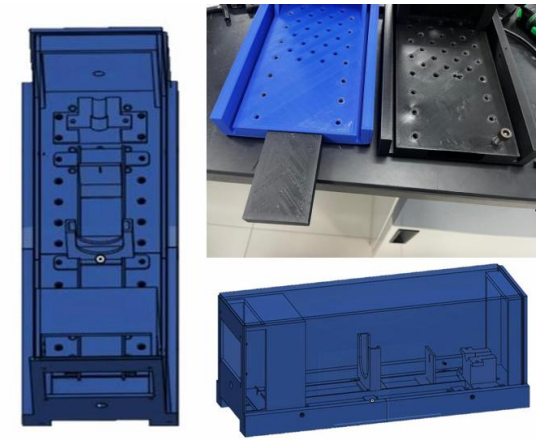


Figura 2. Diseño e impresión de la carcasa del espectrómetro

Montaje experimental del sistema optoelectrónico.

El ensamblado siguió el orden de los siguientes pasos:
Primero se acopló la pantalla GIGA Display con el Arduino en la estructura frontal, conectando los pines del sensor en el interior. Luego se fijó el adaptador FC-FC con tornillos M6 aunada a una fibra FC que conecta con una abertura del tamaño del pigtail en la estructura trasera, la cual será la entrada de las fuentes de luz a caracterizar. Después se atornilló el riel de 35 cm en la superficie interna de la carcasa con tornillos M6. Sobre el riel se montaron en orden: el colimador en su base fija, la ranura de resina en su base desmontable, la primera lente biconvexa, la segunda lente biconvexa, la rejilla de difracción de 600 lineas, y finalmente el sensor CCD lineal con su pieza base atornillada con 4 tornillos M6.

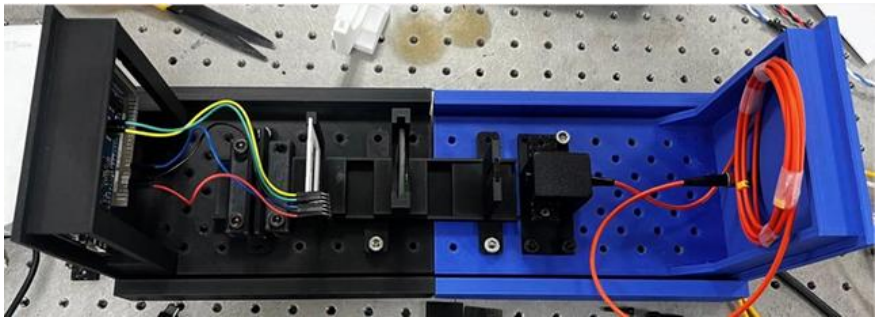


Figura 3. Sistema optoelectrónico ensamblado

En cuanto al hardware, el sensor TSL1401CL tiene 128×1 píxeles y 6 pines. Sus conexiones al Arduino GIGA R1 Wi-Fi fueron:

Pin	Conexión
SI	D5
CLK	D4
OUT	-
A0	A3
GND	GND
VCC	3.3V

Figura 4. Conexiones del sensor TSL1401CL al Arduino GIGA R1

El pin SI indica al sensor cuándo comenzar la captura; CLK proporciona la señal de reloj para desplazar la lectura de los 128 píxeles; A0 entrega la señal analógica proporcional a la intensidad luminosa de cada píxel, GND es tierra y VCC es el voltaje requerido.

Para el software se desarrollaron dos programas.
El programa en Arduino IDE obtención de datos adquiere los valores analógicos de cada píxel en un rango de 0 a 3.3 V, realiza un mapeo entre la posición de cada píxel y un rango de longitudes de onda previamente definido, actualiza la gráfica en la pantalla del sistema y envía los datos por comunicación serial USB.

El programa en Java realizado en intelliJ IDEA es el visualizador gráfico, llamado XpectroAS, recibe los datos del puerto serial, aplica el mismo criterio de mapeo e interpola los puntos para generar una

gráfica más continua. Se aclara que los puntos interpolados no son mediciones reales sino valores estimados, por lo que la interpolación es una herramienta de visualización y no un aumento real de resolución.



Figura 5. Software: a) Arduino IDE, b) IntelliJ IDEA

Finalmente teniendo el hardware, el software y el sistema acomodado para las primeras pruebas se aísla el sistema con la capucha de PLA del tamaño completo del espectrómetro, sellando los espacios por donde pudiera entrar luz exterior que generara ruido óptico o interferencias en las mediciones del sensor, y se comienza con la calibración del sistema.

Calibración con fuentes de luz visible

Antes de calibrar el espectrómetro, se caracterizaron las dos fuentes láser de referencia con equipos comerciales. Para el láser verde, se usó la OSA de Ocean Optics usando una fibra FC-SMA el cual se obtuvo una longitud de onda de 510.00 nm y para el láser rojo se usó la OSA de Anritsu usando una fibra FC-FC obteniendo una longitud de onda de 659.60 nm.

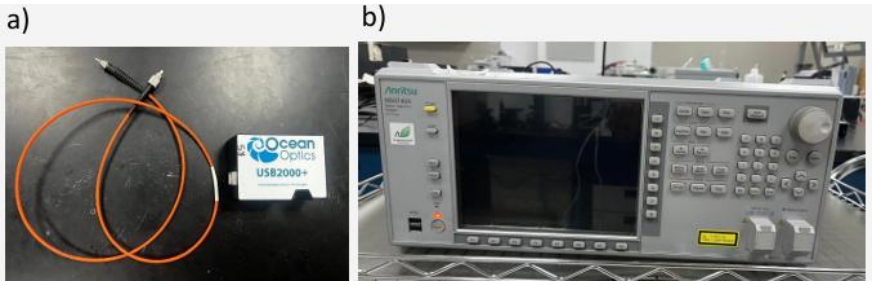


Figura 6. Analizadores de espectros ópticos: a) Ocean Optics, b) Anritsu

Con estas referencias establecidas, cada láser se conectó al espectrómetro mediante una fibra multimodal FC-FC de 3 m, y se procedió a la caracterización hasta coincidir con los valores antes obtenidos y ambos valores se graficaron para identificar los máximos con precisión.

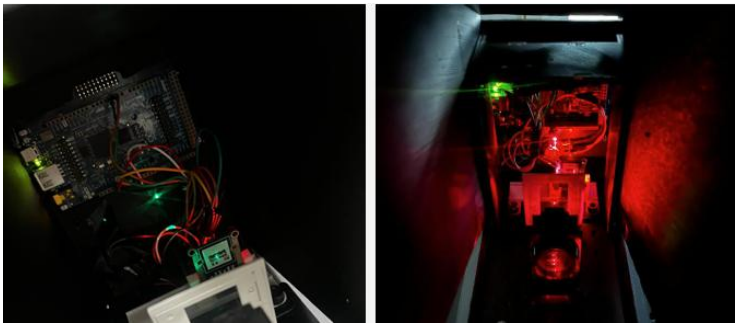


Figura 7. Pruebas de calibración con el láser verde y rojo

Al visualizar en el programa realizado en intelliJ IDEA, y el haz dentro del sistema sin carcasa, se ajustaron iterativamente seis factores que se tomaron en cuenta para la calibración del sistema:

El colimador define la altura de referencia del todo el sistema interno a 30 mm. La ranura debe recibir el haz circular del colimador y dejarlo pasar con forma lineal de 0.02 mm. La primera lente biconvexa (f = 7 cm) controla la longitud del haz en el eje vertical: acercándola o alejándola se hace el haz más agudo o más ancho. La segunda lente biconvexa (f = 11.5 cm) controla el ancho del haz en el eje horizontal, determinando qué área del sensor cubre. La rejilla de 600 líneas/mm opera en primer orden de difracción y debe colocarse cerca del sensor para mantener el sistema compacto.El sensor puede desplazarse en el eje X para alinearse con la región espectral de interés según la rejilla.

Tras los ajustes, el espectrómetro registró el pico del láser rojo en el rango 657–660 nm y el del láser verde en 508–510 nm, coincidiendo satisfactoriamente con los valores de referencia. Se observó cierto ruido en la señal, pero la responsividad del sensor en el rango visible fue adecuada para los fines del proyecto.

Fijación del sistema optoelectrónico

Una vez determinadas experimentalmente las distancias óptimas entre componentes, se procedió a fijar el sistema en una configuración fija.

Se diseñó una pieza integradora que consolidó todas estas posiciones, transformando la configuración ajustable y experimental en una estructura estable, compacta y repetible. Esta fijación redujo errores asociados al movimiento de componentes durante las mediciones, mejoró la estabilidad de la señal y preparó el sistema para integrarse dentro de la carcasa final.

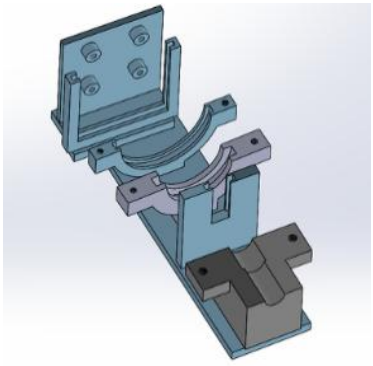


Figura 8. Diseño del módulo optoelectrónico fijo

Las distancias establecidas fueron: 18 mm del colimador a la ranura, 27 mm de la ranura a la primera lente, 23 mm entre la primera y segunda lente, 13 mm de la segunda lente a la rejilla, y 14 mm de la rejilla al sensor. Todas las componentes mantuvieron su altura de 30 mm en alineación con el colimador.

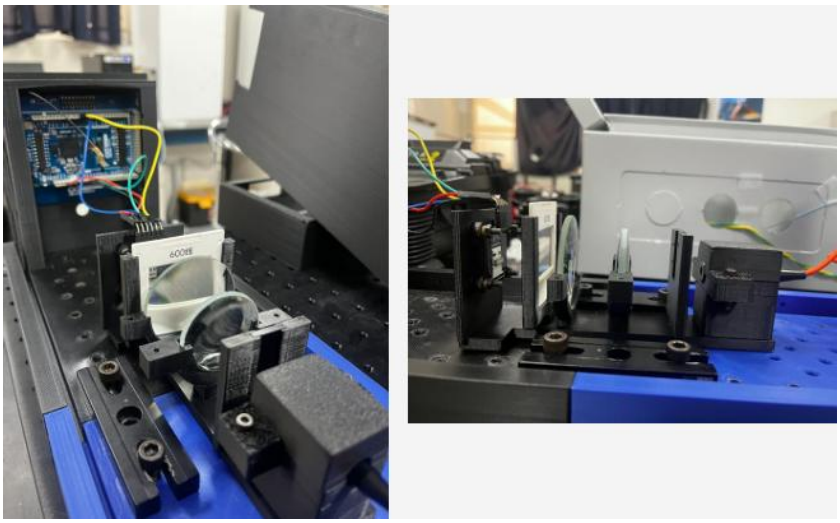


Figura 9. Módulo optoelectrónico fijado al sistema

Caracterización de la fibra de iterbio

El arreglo experimental completo consistió en: controlador de corriente del diodo láser, diodo PLD-6 (950–980 nm) montado sobre placas de aluminio dentro de una cabina tipo locker para disipar calor , 4 m de fibra multimodal de doble revestimiento, PUMP combiner de 6 salidas (cuya función es reducir la potencia óptica propagada para proteger el diodo, ya que la fibra no discrimina la dirección de transmisión de luz), 3 m de fibra dopada de iterbio (1020–1080 nm, medio de ganancia del sistema), pig tail FC como puente de conexión hacia cada analizador.

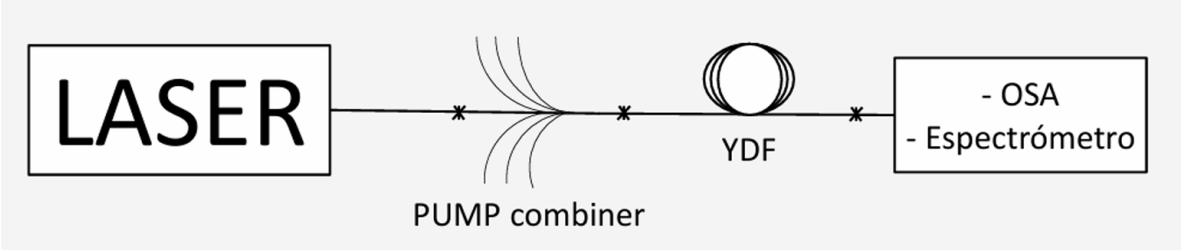


Figura 10. Sistema de la fibra de iterbio

La caracterización se realizó en paralelo en el espectrómetro casero y en la OSA de Anritsu, variando la corriente del diodo entre 0.20 A y 1.30 A. En el espectrómetro se observó que de 0.20 A a 0.92 A únicamente se aprecia el pico espectral del diodo de bombeo, con intensidad creciente conforme aumenta la corriente. Al superar 1.30 A aparece simultáneamente la disminución del pico del diodo (absorción) y el surgimiento del pico de emisión de la fibra de iterbio. También se observó que, a mayor corriente, mayor ruido óptico captado por el sensor, lo que dificultó la definición de los picos en el NIR.

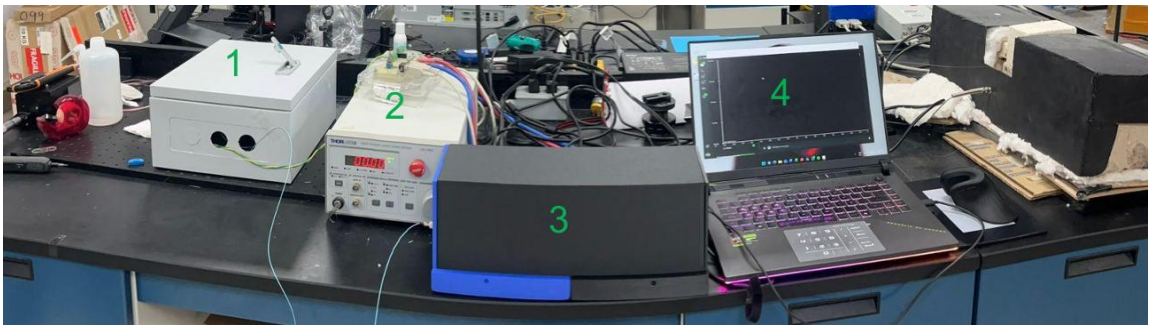


Figura 11. Montaje final para la caracterización de la fibra de iterbio iterbio :1. Cabina del sistema YDF, 2. Controlador del diodo láser, 3. Espectrómetro, 4. Visualizador gráfico (computadora).

La validación con la OSA de Anritsu, operada en el mismo rango de corrientes, confirmó los picos en 968.75 nm para el diodo de bombeo y en 1063.37 nm para la emisión de la fibra de iterbio. La tendencia general del espectro obtenido con el espectrómetro realizado fue similar a la registrada con el equipo comercial, aunque con menor resolución, mayor ruido, saturación en ciertas regiones y pequeños desfases de calibración atribuibles a las limitaciones de sensibilidad del sensor TSL1401CL en el infrarrojo cercano y a las tolerancias mecánicas propias de la impresión 3D.

RESULTADOS

Al realizar la caracterización de los láseres verde y rojo utilizando los analizadores de espectro óptico comerciales, Ocean Optics y Anritsu, con el propósito de obtener valores de referencia para la calibración del prototipo. En estas mediciones se identificó el pico del láser verde en 510.00 nm y el pico del láser rojo en 659.60 nm los cuales se graficaron.

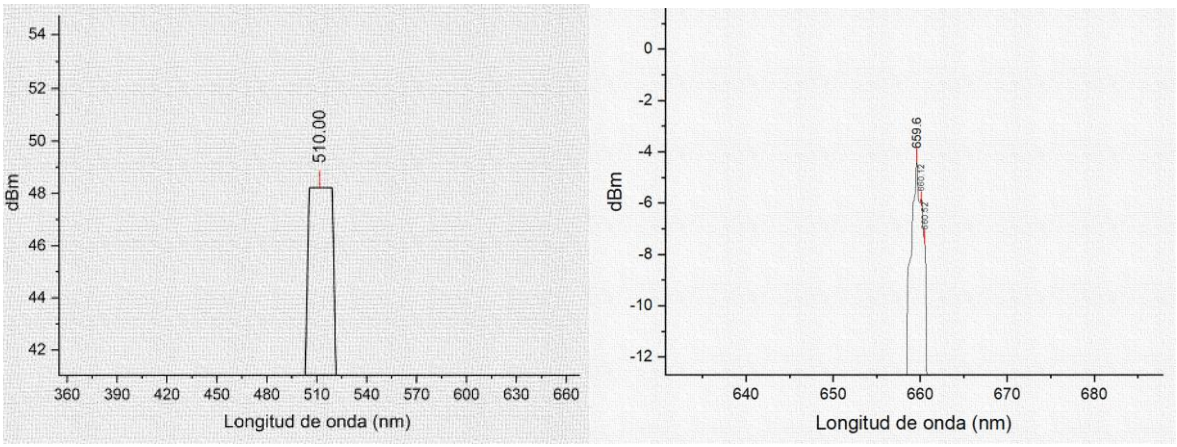


Figura 12. Resultados de los picos espectrales de los láseres en la OSA comercial: a) Verde (510.00 nm), b) Rojo (659.60 nm)

El espectrómetro VIS–NIR fabricado mediante impresión 3D logró registrar correctamente señales espectrales en el rango visible. Durante la calibración con fuentes monocromáticas, se identificó el pico del láser verde en 510.00 nm y el pico del láser rojo alrededor de 660.00 nm, valores que se adaptaron para coincidir de manera adecuada con las mediciones obtenidas mediante los equipos comerciales de Ocean Optics y Anritsu. Esto demuestra que el prototipo presenta un mejor desempeño en la región visible del espectro.

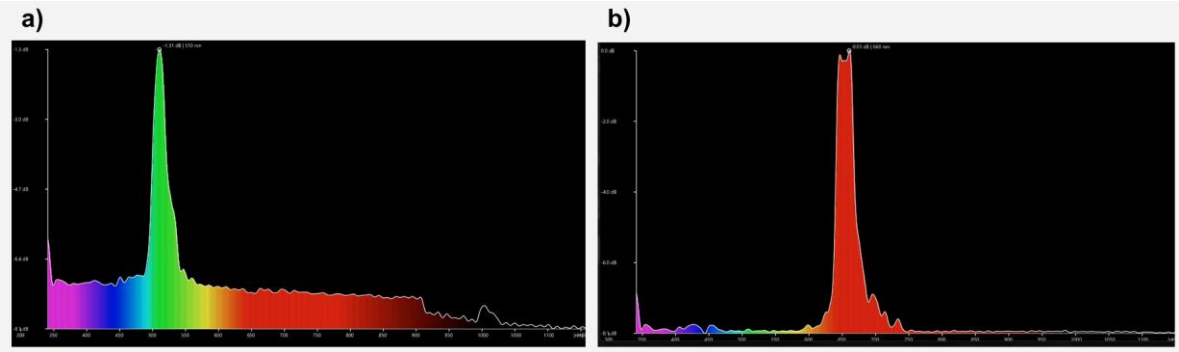


Figura 13. Resultados obtenidos de la caracterización de los láseres en el espectrómetro:
a) Verde (510.00 nm),
b) Rojo (660.00nm).

Una vez validado el funcionamiento del espectrómetro en el visible, se realizó la caracterización de la fibra dopada con iterbio. En el espectrómetro 3D se observó el pico del diodo láser de bombeo en el intervalo de 960 nm a 980 nm, así como una señal asociada a la fibra de iterbio alrededor de 1180 nm.

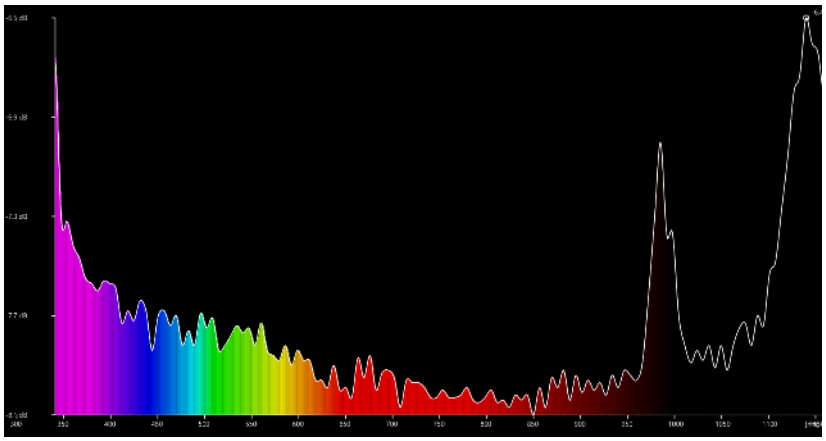


Figura 14. Picos espectrales del diodo y de la fibra de iterbio en el espectrómetro:
pico de absorción (960.00 nm – 980.00 nm), pico de emisión (1100 nm – 1180 nm)

Al comparar estos resultados con la OSA Anritsu, se obtuvo un pico del diodo en 968.75 nm y un pico de emisión de la fibra en 1063.37 nm.

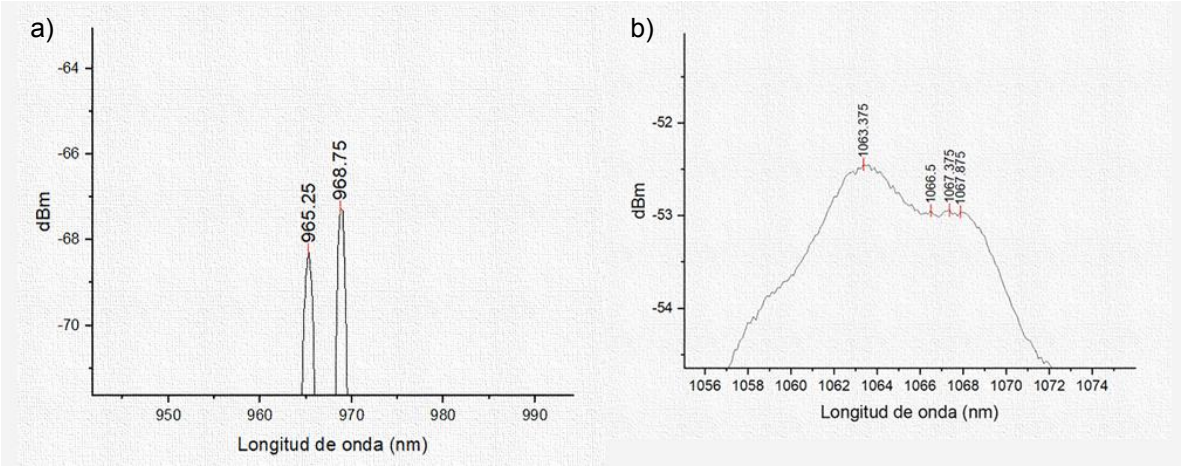


Figura 15. Resultados obtenidos de la caracterización de la fibra de iterbio en la OSA de Anritsu: a) Pico de absorción (968.75 nm), b) Pico de emisión (1063.37 nm).

CONCLUSIONES

El espectrómetro VIS–NIR impreso en 3D presentó un mejor desempeño en el rango visible, donde logró identificar correctamente los picos de los láseres verde y rojo después de adaptar el sistema con base en las mediciones de referencia obtenidas con los analizadores de espectro óptico comerciales. Esto demuestra que el prototipo puede reproducir con buena coincidencia los picos principales de fuentes monocromáticas en la región visible.

A partir de la calibración realizada, se obtuvo una resolución aproximada de 8.5 longitudes de onda por píxel, lo que permitió observar los picos principales y analizar tendencias espectrales generales. Sin embargo, esta resolución también representa una limitación cuando se requieren mediciones más precisas o la identificación de pequeños desplazamientos en longitud de onda.

En la caracterización de la fibra dopada con iterbio, el pico del diodo láser fue el más aproximado al valor obtenido con la OSA Anritsu. No obstante, el pico de emisión de la fibra presentó un desplazamiento, registrándose cerca de 1180 nm en el espectrómetro 3D frente a 1063.37 nm en la OSA comercial. Esta diferencia se atribuye principalmente a la descalibración del módulo fijo, la baja responsividad del sensor CCD en el infrarrojo cercano y la resolución del sistema.

Además, al aumentar la corriente del sistema se incrementó el ruido óptico, por lo que fue necesario utilizar la exposición máxima de 25000 µs para visualizar los picos de la fibra dopada con iterbio. Por ello, el prototipo es funcional para observar tendencias espectrales, aunque requiere mejoras para realizar mediciones precisas en el rango NIR.

Aunque el prototipo requiere mejoras para realizar mediciones precisas en el NIR, demostró ser funcional para observar tendencias espectrales y comprender experimentalmente el funcionamiento de un espectrómetro. Por ello, representa una alternativa accesible y viable para su uso en docencia, prácticas de laboratorio y formación experimental en óptica y fotónica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Carvalho, M. S. D., Bottini, R., & de Lira Faria, L. M. (2024). Transforming pixels into spectra: The educational journey of recycling an old optical system. Journal of Chemical Education, 102 (1), 270–280.
2. Hecht, E. (2017). Optics (5th ed.). Pearson.

3. Holst, G. C., & Lomheim, T. S. (2011). CMOS/CCD sensors and camera systems (2nd ed.). SPIE Press.
4. Paschotta, R. (2025, noviembre). Case study: Ytterbium-doped 975-nm fiber lasers. RP Photonics. https://www.rp-photonics.com/case_study_975_nm_fiber_lasers.html
5. Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. S., & Pedrotti, L. M. (2017). Introduction to optics (3rd ed.). Cambridge University Press.
6. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2019). Fundamentals of photonics (3rd ed.). Wiley.
7. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). Principles of instrumental analysis (7th ed.). Cengage Learning.
8. Toloza Díaz, W. (s. f.). Enseñanza de los fenómenos de difracción e interferencia de la luz a partir de procesos experimentales.
9. Zervas, M. N., & Codemard, C. A. (2014). High power fiber lasers: A review. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 20(5), 219–241. https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2321279

INTERFEROMETRIA DE DESPLAZAMIENTO LATERAL CON ILUMINACION POLICROMATICA PARA LA RECUPERACIÓN DEL GRADIENTE DE FASE

José Escamilla Ángeles[1, 2], Ana Karen Reyes[1], y Noel-Iván Toto-Arellano[1]

[1,] Universidad Tecnológica de Tulancingo, [2]Universidad Politécnica de Tulancingo.
jose.angeles.81216@gmail.com

RESUMEN

La caracterización de muestras transparentes dinámicas mediante interferometría convencional suele enfrentar limitaciones debido al ruido de moteado generado por fuentes de luz coherentes y la necesidad de múltiples capturas temporales. La interferometría de luz blanca surge como una alternativa para obtener mediciones con alta resolución espacial y reducción del ruido de moteado. En este trabajo se presenta un interferómetro de trayectoria cíclica iluminado con luz policromática, el cual integra una etapa de polarización y replicación. Esta configuración permite la obtención simultánea de cuatro interferogramas con corrimientos de fase independientes. Para el procesamiento, los patrones policromáticos se descomponen en los canales RGB (rojo, verde y azul). La modulación de fase se realiza mediante el control de la polarización en cada réplica, permitiendo la recuperación del gradiente de fase en un solo disparo. Se evaluó el desempeño del sistema utilizando objetos de fase estáticos y dinámicos. El análisis por canales mostró que los componentes R y G mantienen una visibilidad de franjas óptima para la reconstrucción, mientras que el canal B mostró limitaciones por la respuesta espectral del sensor. Para demostrar la viabilidad del sistema interferométrico, se presentan las aberraciones ópticas de una lente, el ala de una libélula y la visualización de variaciones del índice de refracción generadas por el flujo térmico de la llama de una vela. El sistema propuesto demuestra ser una herramienta robusta para el análisis de fenómenos dinámicos mediante el uso de iluminación de baja coherencia temporal. La capacidad de obtener múltiples interferogramas en una sola captura elimina la necesidad de dispositivos de desplazamiento de fase mecánicos, facilitando la caracterización de gradientes de fase en tiempo real con una configuración estable.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las técnicas de medición óptica han permitido conocer la topografía, rugosidad, espesor y una gran variedad de propiedades ópticas de objetos especulares, difusos, transparentes entre otros [1-10], con la capacidad de medir regiones equiparables al campo de visión del sistema óptico implementado y de no contacto directo con la muestra [4-8], siendo técnicas no-invasivas y de alta precisión. En la actualidad, las técnicas interferométricas están siendo utilizadas en áreas industriales como manufactura, aeroespacial, biomédicas, académicas, científicas [7-11] y para el desarrollo del conocimiento de frontera [12-19].

Las técnicas interferométricas requieren recuperar la fase óptica para calcular diferentes parámetros del objeto bajo estudio, ya que sus propiedades físicas se encuentran codificadas en las franjas de interferencia generadas, convencionalmente, es necesario adecuar alguna técnica interferométrica dependiendo del tipo de análisis que se desee realizar. Los interferogramas resultantes suelen contar con propiedades conocidas [20-21], y de estas se derivan los métodos de recuperación de fase óptica, los cuales se adecuan dependiendo de las características de los interferogramas a analizar.

Algunas de las técnicas comúnmente empleadas para la recuperación de fase es la técnica de Fourier [22-24], sin embargo, presenta la desventaja de requerir una alta densidad de franjas en el interferograma, lo que implica que el sistema de captura de imágenes deba tener una buena resolución espacial. Las técnicas interferométricas de corrimiento de fase por etapas [25-31], usan componentes mecánicas para desplazar espejos o elementos en el sistema óptico, que permitan generar una diferencia de fase que se refleja como un desplazamiento de franjas en el

interferograma, esta técnica tiene la ventaja de poder usar un bajo número de franjas para recuperar la fase óptica, sin embargo, se requiere de al menos dos interferogramas para el cálculo, lo que limita al estudio de muestras estáticas o con variaciones temporales muy lentas.

Actualmente se han desarrollado técnicas avanzadas de corrimiento de fase simultaneo que genera varios interferogramas con diferentes corrimientos de fase independientes, lo que permite el estudio de objetos estáticos y dinámicos. Algunas de estas técnicas emplean arreglos con cuatro cámaras, elementos holográficos y difractivos [32-34], las más representativas de esta área son los dispositivos y métodos desarrollados por el grupo de Wyant et al [35-36] que usan mascaras pixeladas con un arreglo de micropolarizadores que generan cuatro patrones simultáneos, a partir de los cuales se puede calcular la fase óptica, estos dispositivos se han implementados para mediciones dinámicas en diversas escalas y para múltiples aplicaciones [37-38].

En este trabajo se ha desarrollado un sistema óptico iluminado con una fuente de luz blanca (Interferómetro de Luz Blanca: ILB) para mediciones dinámicas de fase: Este sistema puede generar cuatro patrones simultáneos con corrimientos de fase independientes usando sistemas de replicación acoplados en cascada a la salida del interferómetro principal. El interferómetro base consiste de un interferómetro triangular de trayectoria cíclica polarizado (ITTCP), genera un interferograma con propiedades de polarización conocidas y tiene la característica de ser estable ante vibraciones mecánicas.

INTERFEROMETRO TRIANGULAR DE TRAYECTORIA CICLICA POLARIZADO

En un interferómetro de trayectoria cíclica los haces se contrapropagan colinealmente, por lo que la diferencia de camino óptico es mínima, permitiendo así alinearlos fácilmente usando fuentes con baja longitud de coherencia. Esta característica también permite que el sistema sea estable ante vibraciones externas; por este motivo se ha usado un interferómetro triangular de trayectoria cíclica polarizado (ITTCP) para la generación de interferogramas policromáticos. En la Fig.1 se presenta el ITTCP el cual está iluminado por una fuente de arco de mercurio que tiene una potencia de $\mathbf{50}\,\boldsymbol{mW}$, longitud de onda media de $\mathbf{546.1}\,\boldsymbol{nm}$ (FLB), y una longitud de coherencia de $\approx\ \mathbf{0.05}\ \boldsymbol{mm}$. El haz emergente de la fuente es enfocado con la lente $\mathbf{L_0}$ en el sistema de filtraje espacial (SFE) formado por un objetivo de microscopio y filtro espacial, posteriormente el sistema de colimación (SC) generara un frente de onda plano.

El frente de onda colimado no está polarizado, por lo que se adiciona un polarizador lineal a 45° ($\boldsymbol{P_0}$), para generar el estado de polarización correspondiente. En el ITTCP el divisor cubico polarizante (DCP) refleja y transmite el haz incidente en trayectorias paralelas cíclicas opuestas (contra propagación colineal), que interfieren para generar el patrón base (PB). En la salida del ITTCP, se coloca un retardador de cuarto de onda (RCO) a 45º respecto al eje axial, para compensar la depolarización que se pueda generar por la fuente de luz blanca, y generar estados de polarización circulares cruzados [38-41].

Acoplados al ITTCP los dos sistemas Michelson (SM) mostrados en la Figura 1, funcionan como replicadores, el SM-1 genera dos interferogramas ($\boldsymbol{PI_1}$ y $\boldsymbol{PI_2}$), a la salida del SM-2 se generan las cuatro réplicas de los patrones (**1**, **2**, **3**, y **4**). En esta etapa, para generar los cuatro corrimientos de fase de $\boldsymbol{\pi/2}$ independientes en cada patrón, se coloca una máscara de polarizadores lineales (MP) con cuatro polarizadores previamente orientados a 0°, 45°, 90° y 135°, los cuales generan corrimientos relativos de fase de 0°, 90°, 180° y 270° respectivamente en cada réplica. La lente $\boldsymbol{L_1}$ enfoca la imagen de los patrones sobre el plano de la cámara (C), la cual es un sensor CMOS que permite registrar los patrones de interferencia y digitalizarlos. Posteriormente, los interferogramas son procesados digitalmente para el cálculo de la fase óptica. La resolución de la cámara usada es de 3.1 mega pixeles, debido a que se obtienen cuatro patrones en una sola imagen, la resolución de cada interferograma es de $\mathbf{700} \times \mathbf{700}$ pixeles.

Los polarizadores lineales de la máscara se obtuvieron al corlarlos de una lámina convencional tipo Polaroid utilizando una máquina de corte láser. Para garantizar la correcta generación de los

corrimientos de fase, se realizó un proceso de calibración angular empleando un polarizador de referencia previamente calibrado, verificando que los ejes de transmisión de cada elemento coincidieran con los ángulos de 0°, 45°, 90° y 135°. Esta etapa permitió minimizar errores asociados a desalineaciones angulares y asegurar la adecuada introducción de los desplazamientos relativos de fase requeridos por el algoritmo interferométrico de cuatro pasos.

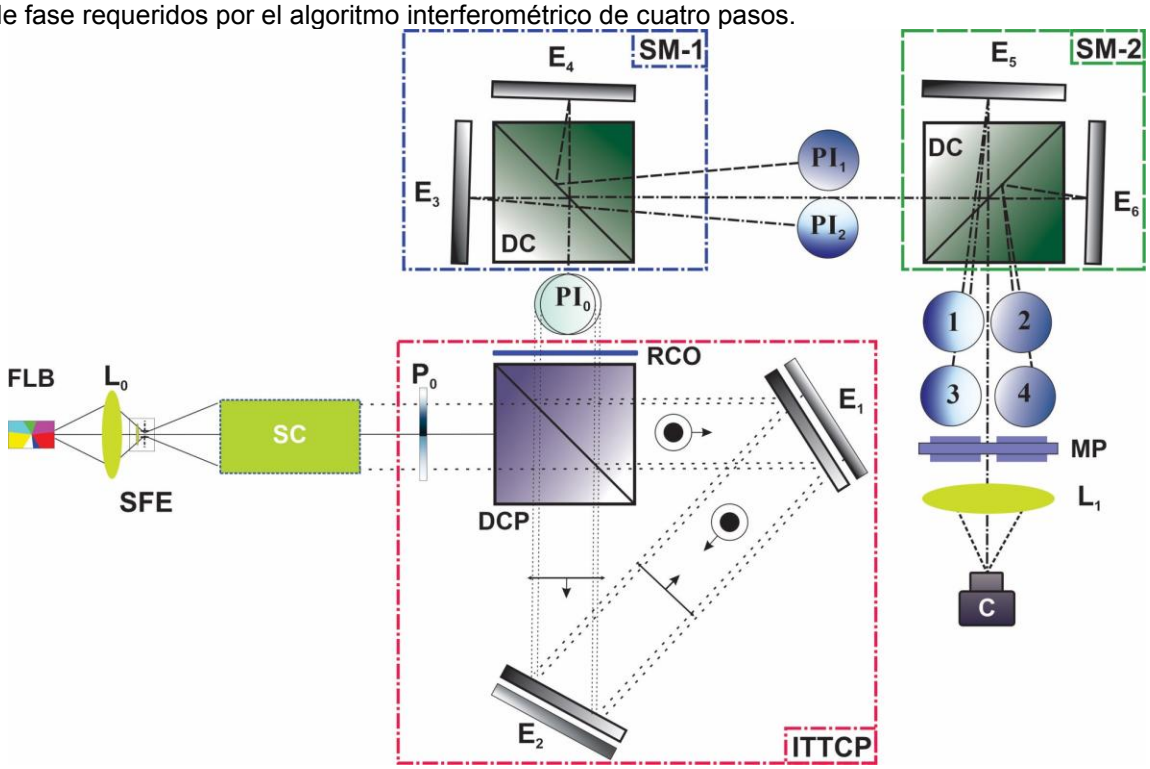


Figura 1. Diagrama experimental. FLB: Fuente de luz blanca. L_o: Lente. SFE: Sistema de Filtraje Espacial. SC: Sistema colimador. P_0: Polarizador lineal. DCP: Divisor cubico polarizante. RCO: retardador de cuarto de onda. PI_0: Patrón de Interferencia base. M_i: Espejos. DC: Divisor cubico. PI_i: Patrones de interferencia. MP: Mascara de polarizadores. L_1: Lente zoom. C. Cámara CMOs. 1,2,3,4: Replicas de los patrones de interferencia

ALGORITMO DE CUATRO PASOS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA FASE ÓPTICA

La fase óptica se calcula a partir de los cuatro interferogramas generados en una sola toma de la cámara y que están definidos de la siguiente manera [42-43]:

$$\boldsymbol{I(x,y)_1 = A_0 + v(x,y)cos[\psi(x,y)]\ ,\ \theta = 0°\ ,\ \delta_0 = 0} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{I(x,y)_2 = A_0 - v(x,y)sen[\psi(x,y)]\ ,\ \theta = 45°,\ \delta_0 = \frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{I(x,y)_3 = A_0 - v(x,y)cos[\psi(x,y)]\ ,\ \theta = 90°,\ \delta_0 = \pi} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{I(x,y)_4 = A_0 + v(x,y)sen[\psi(x,y)]\ ,\ \theta = 135°,\ \delta_0 = \frac{3\pi}{2}} \quad (4)$$

donde $\boldsymbol{A_0}$ representa la intensidad promedio o intensidad de fondo y $\boldsymbol{v(x,y)}$ la amplitud de modulación o contraste de las franjas de interferencia. A través de la resolución del sistema de cuatro ecuaciones (1-4), es posible obtener la fase óptica a partir de la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{\psi(x,y) = arctan\left[\frac{I(x,y)_4 - I(x,y)_2}{I(x,y)_1 - I(x,y)_3}\right]} \quad (5)$$

Debido al uso de la función arco tangente, la fase $\boldsymbol{\psi(x,y)}$ obtenida se encuentra delimitada dentro del rango $[-\boldsymbol{\pi},\boldsymbol{\pi})$, por lo que se le denomina fase envuelta. Para eliminar dichas discontinuidades, es necesario emplear un método de desenvolvimiento de fase, en este caso particular, se emplea el algoritmo reportado por Ghiglia, et al [44]. Los resultados presentados muestran la fase efectiva del

objeto analizado ($\Delta\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x},\mathbf{y})$), esto se logra ya que se realiza una sustracción entre una fase de referencia ($\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})_r$) y la fase medida con la muestra ($\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})_m$). Este procedimiento permite eliminar la fase de fondo introducida por el frente de onda con aberraciones. Para ello, se captura una imagen de referencia de los cuatro patrones resultantes sin el objeto de fase, calculando así $\boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})_r$, posteriormente, la muestra se introduce en el interferómetro y se realiza nuevamente la captura de los interferogramas resultantes bajo las mismas condiciones experimentales. Por lo tanto, la fase efectiva $\Delta\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ queda definida cómo:

$$\Delta\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})_m - \boldsymbol{\psi}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})_r \tag{6}$$

RESULTADOS

Con el propósito de validar el sistema interferométrico propuesto, se realizaron pruebas experimentales utilizando objetos de fase estáticos y dinámicos, para ambos casos, se obtuvieron simultáneamente cuatro interferogramas policromáticos, los cuales fueron separados en sus componentes RGB para analizar la calidad de cada canal espectral. Una vez separados los canales, se recupera la fase óptica mediante el algoritmo clásico de cuatro pasos aplicado al canal verde, debido a que experimentalmente presentó la mejor respuesta de visibilidad en las franjas de interferencia y una mejor relación señal-ruido.

La Figura 2 muestra los interferogramas policromáticos obtenidos para un frente de onda de referencia con aberraciones de esfericidad, la separación de los canales RGB y la recuperación de la fase óptica. Los resultados muestran que los canales rojo y verde presentan mejor contraste en las franjas, permitiendo recuperar una distribución de fase óptica suave y continua asociada a las aberraciones introducidas en el sistema óptico, por otro lado, el canal azul presentó una disminución importante en la visibilidad de las franjas, atribuida principalmente a la respuesta espectral del sensor CMOS y a las características de coherencia de la fuente policromática utilizada.

En la Figura 3 se presentan los resultados experimentales obtenidos al colocar una sección del ala de una libélula como objeto de fase. Las variaciones observadas en los interferogramas y en el mapa de fase corresponden a cambios locales de espesor y a las microestructuras presentes en la membrana del ala, de igual manera, se hizo uso del canal verde para la recuperación de fase. La Figura 4 muestra una secuencia temporal de mapas de fase obtenidos durante un evento dinámico generado por la flama de una vela, en este caso las variaciones temporales observadas corresponden a cambios en el gradiente del índice de refracción del aire provocados por las corrientes de aire y las fluctuaciones térmicas.

Estos los resultados muestran que el interferómetro propuesto permite recuperar información cuantitativa de fase utilizando luz blanca y corrimiento de fase simultáneo para muestras estáticas y con variaciones temporales. La separación espectral RGB permitió identificar que el canal rojo y verde permiten recuperar la información, mientras que el canal azul presenta menor visibilidad debido a la respuesta espectral del sensor CMOS.

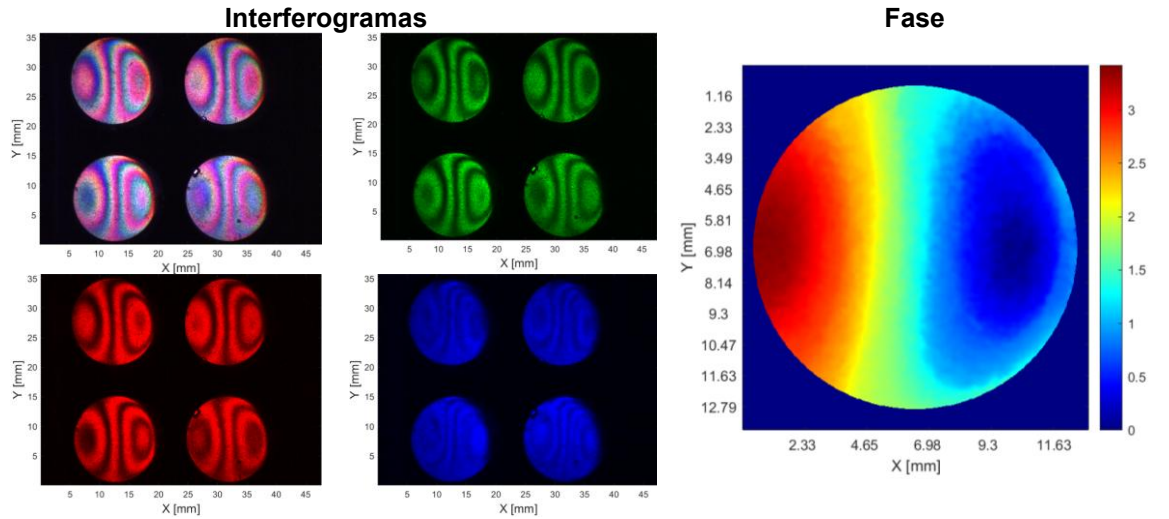


Figura 2. Frente de onda de referencia con aberraciones de esfericidad. Interferogramas policromáticos obtenidos con iluminación de luz blanca y su separación en canales RGB. La imagen de la derecha muestra la fase óptica recuperada mediante el algoritmo de cuatro pasos aplicado al canal verde para un frente de onda con aberraciones de esfericidad.

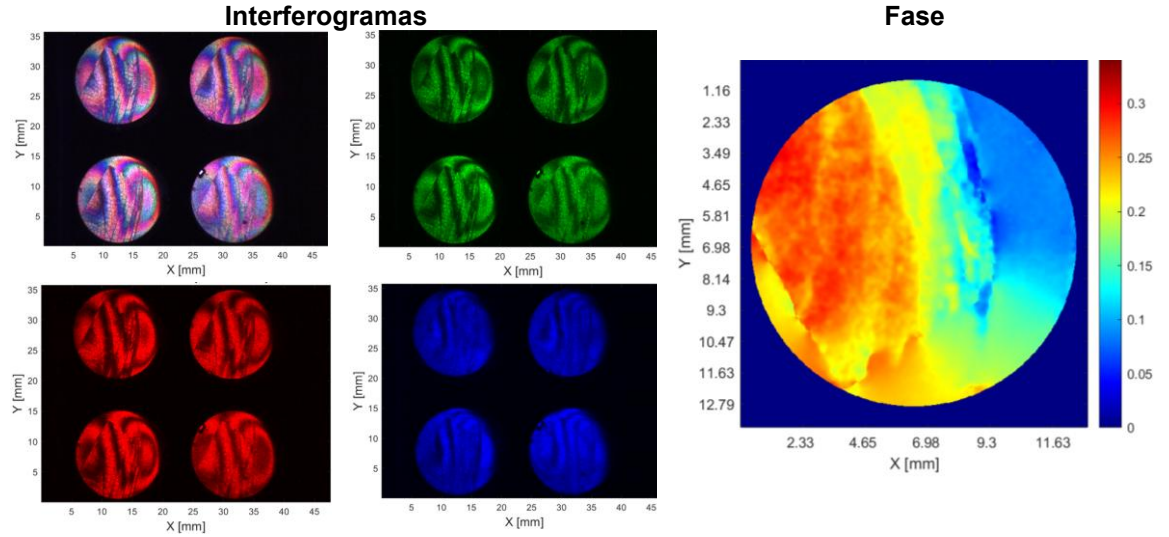


Figura 3. Interferogramas policromáticos de una sección del ala de una libélula y separación en los canales RGB. La imagen de la derecha corresponde a la fase óptica recuperada mediante el algoritmo de cuatro pasos aplicado al canal verde.

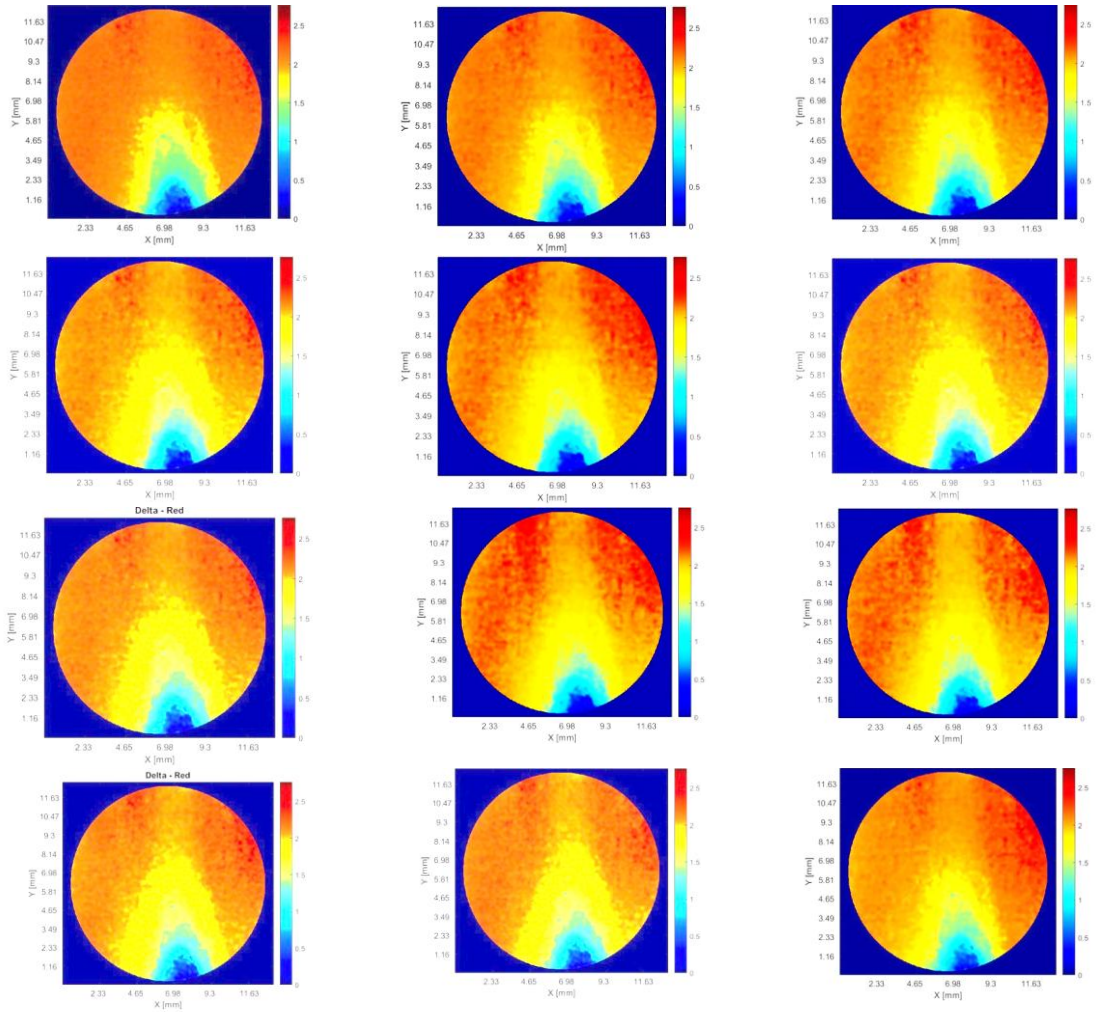


Figura 4. Evento dinámico generado por la flama de una vela. Secuencia temporal de mapas de fase obtenidos durante un evento dinámico generado por la flama de una vela. las variaciones observadas corresponden a cambios en el gradiente del índice de refracción producidos por el flujo térmico del aire caliente.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las técnicas interferométricas de corrimiento de fase (PSI) permiten recuperar la fase óptica con alta precisión y presentan baja sensibilidad a variaciones de intensidad y a no uniformidades del detector. Además, no requieren localizar el centro de las franjas, por lo que pueden procesar patrones con pocas franjas visibles, característica especialmente útil en interferometría de luz blanca debido a la baja coherencia temporal de la fuente. En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema interferométrico de corrimiento de fase simultáneo capaz de operar con iluminación policromática y generar cuatro interferogramas en una sola exposición. La configuración basada en un interferómetro triangular de trayectoria cíclica polarizado mostró estabilidad mecánica frente a vibraciones externas y permitió recuperar información de fase en objetos estáticos y dinámicos.

Una limitante del sistema reportado es la sección trasversal de las réplicas que, para este arreglo, no debe ser mayor de 20mm, a consecuencia del tamaño de los divisores de 50mm, esta desventaja puede solventarse usando espejos esféricos y sistemas de lentes, sin embargo, esto está fuera del alcance de la investigación. Otra consideración que debe tenerse en cuenta con el sistema propuesto es el tamaño relativo de las cuatro réplicas, las cuales pueden ser diferentes, si no se cuida la alineación de los sistemas que las generan; para el caso del SM, los espejos de cada brazo deben

estar a la misma distancia, por lo que se han colocado sobre una montura con desplazamiento micrométrico, sucede los mismo con el ITTCP, en ambos casos se verifican los tamaños con una escala de referencia tomada previamente con el patrón generado por el ITTCP.

Los resultados experimentales demostraron la capacidad del sistema para reconstruir frentes de onda con aberraciones, analizar muestras biológicas semitransparentes y visualizar variaciones temporales en el índice de refracción producidas por fenómenos térmicos dinámicos, como la flama de una vela. El análisis espectral mostró que los canales rojo y verde mantienen buena visibilidad de franjas, mientras que el canal azul presenta menor modulación interferométrica debido a la respuesta espectral del sensor CMOS. Experimentalmente, el canal verde proporcionó la mejor relación señal-ruido para la recuperación de fase mediante el algoritmo clásico de cuatro pasos. La combinación de iluminación de luz blanca el procesamiento RGB y la generación simultanea de cuatro interferogramas, permitió reducir el ruido de moteado y eliminar la necesidad de desplazamientos mecánicos de fase, haciendo viable el análisis de fenómenos dinámicos en tiempo real.

BIBLIOGRAFÍA

1. P. Hariharan, Basics of Interferometry, Elsevier Inc., 2007.
2. D. Malacara, Optical Shop Testing, third ed., Wiley, New York, 2007.
3. P. Rastogi, ed., Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques (John Wiley, 2001).
4. W. Steinchen and L. X. Yang, Digital Shearography; Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry (SPIE Press, 2003).
5. B. Saif, P. Greenfield, M. Bluth, L. Feinberg, J. Wyant , and R. Keski-Kuha, “Tracking Sub-Nanometer Thermal Structural Changes with Speckle Interferometry”, App. Opt. 59(22) G204-G208 (2020).
6. L. L. Deck, “Interferometric methods and systems using low coherence illumination,” U.S. patent 5,953,124 (14 September 1999)
7. A. E. Lowman and J. E. Greivenkamp, Modeling an interferometer for non-null testing of aspheres, in Optical Manufacturing and Testing, V. J. Daughtery and H. Stabl, eds., Proc. SPIE 2536, 139–147 (1995).
8. P. J. Caber, Interferometric profiler for rough surfaces, Appl. Opt. 32, 3438–3441 (1993).
9. J. C. Wyant, Laser Focus World (September), 131-135, 1993.
10. Li, M.C., Wan, D.S. & Lee, C.C. Application of white-light scanning interferometer on transparent thin-film measurement. Appl. Opt. 51, 8579–8586 (2012).
11. H. Pham, H. Ding, N. Sobh, M. Do, S. Patel, G. Popescu, Off-axis quantitative phase imaging processing using CUDA: toward real-time applications, Biomed. Opt. Express 2 (7) (2011) 1781–1793.
12. Dahiya, S., Tyagi, A., Mandal, A. et al. Ultrathin picoscale white light interferometer. Sci Rep 12, 8656 (2022).
13. Virendra N. Mahajan; Daewook Kim, Tribute to James C. Wyant: The Extraordinaire in Optical Metrology and Optics Education, Proc. SPIE 11813 (2021)
14. B. Saif, P. Greenfield, M. Bluth, L. Feinberg, J. Wyant , and R. Keski-Kuha, Tracking Sub-Nanometer Thermal Structural Changes with Speckle Interferometry, App. Opt. 59(22) G204-G208 (2020).
15. B. Saif, D. Chaney, P. Greenfield, M. Bluth, K. Van Gorkom, K. Smith, J. Bluth, L. Feinberg, J. Wyant, M. NorthMorris, R. Keski-Kuha, Measurement of picometer-scale mirror dynamics, App. Opt. 56(23) 6457-6465 (2017).
16. B. Saif, P. Greenfield, M. North-Morris, M. Bluth, L. Feinberg, J. Wyant, R. Keski-Kuha, Sub-picometer dynamic measurements of a diffuse surface, App. Opt. 58(12) 3156-3165 (2019).
17. B R Abbott, R Adhikari, P Ajith, B Allen, G Allen, R S Amin, S B Anderson, W G Anderson, M A Arain, LIGO: the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, Rep. Prog. Phys. 72 076901 (2009)
18. R. Abbott et al. Seismic isolation enhancements for initial and advanced LIGO. Class. Quant. Grav., 21:S915–S921, 2004

19. A. Abramovici, W. E. Althouse, R.W. P. Drever, Y. Gurser, S. Kawamura, F. J. Raab, D. Shoemaker, L. Sievers, R. E. Spero, K. S. Thorne, R. E. Vogt, R. Weiss, S. E. Whitcomb and M.E. Zucker, LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, SCIENCE, 256(5055) 325-333 (1992).
20. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, Phase Detection Algorithms in interferomgram Analysis for Optical Testing, Wiley, New York, 2005.
21. T. Kreis, ed., Handbook of Holographic Interferometry, Optical and Digital Methods (Wiley, 2005).
22. M. Takeda, H. Ina, y S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, J. Opt. Soc. Am, vol. 72, núm. 1, 1982.
23. D. Paoletti, G. Schirripa Spagnolo, Fast Fourier Transformed Electronic Speckle Contouring for Diffuse Surfaces Profilometry, Optics and Lasers in Engineering, 20, (1994), (87—96).
24. Kreis, T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method. Journal of the Optical Society of America A, vol. 3, núm. 6, pp. 847–855 (1986).
25. Creath, K. Phase-shifting speckle interferometry. Applied Optics, vol. 24, núm. 18, pp. 3053–3058 (1985).
26. Hariharan, P., Oreb, B. F., y Eiju, T. Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm. Applied Optics, vol. 26, núm. 13, pp. 2504–2506 (1987).
27. D. Malacara, Phase shifting interferometry*, Revista Mexicana de Fisica, vol. 36, núm. 1, pp. 6–22, 1990.
28. M. Servin, J. A. Quiroga, y J. Moisés Padilla, Fringe Pattern Analysis for Optical Metrology, 1a. Weinheim Germany: WILEY-VCH, 2014.
29. P. Hariharan, B. F. Oreb, y T. Eiju, Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, 1987.
30. C.-C. Kao, G.-B. Yeh, S.-S. Lee, C.-K. Lee, C.-S. Yang, y K.-C. Wu, Phase-shifting algorithms for electronic speckle pattern interferometry, Appl Opt, vol. 41, núm. 1, pp. 46–54, 2002.
31. Schmit, J., y Creath, K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry. Applied Optics, vol. 34, núm. 19, pp. 3610–3619 (1995).
32. Cheng, Y.-Y., y Wyant, J. C. Two-wavelength phase shifting interferometry. Applied Optics, vol. 23, núm. 24, pp. 4539–4543 (1984).
33. Cheng, Y.-Y., y Wyant, J. C. Multiple-wavelength phase-shifting interferometry. Applied Optics, vol. 24, núm. 6, pp. 804–807 (1985).
34. Kwon, O.-Y. Multichannel phase-shifted interferometer. Optics Letters, vol. 9, núm. 2, pp. 59–61 (1984).
35. Novak, M., Millerd, J. E., Brock, N., North-Morris, M., y Wyant, J. C. Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer. Applied Optics, vol. 44, núm. 32, pp. 6861–6868 (2005).
36. Neal, R. M., y Wyant, J. C. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer. Applied Optics, vol. 45, núm. 15, pp. 3463–3476 (2006).
37. Kimbrough, B. T. Pixelated mask spatial carrier phase shifting interferometry algorithms and associated errors. Applied Optics, vol. 45, núm. 19, pp. 4554–4562 (2006).
38. Zheng, D., Chen, L., Li, J., Gu, C., Zhu, W., y Han, Z. Simultaneous phase-shifting interferometry: immune to azimuth error of fast-axes in retarder array. Applied Optics, vol. 54, núm. 33, pp. 9803–9808 (2015).
39. V. H. Flores Muñoz, N.-I. Toto Arellano, D. I. Serrano García, A. Martínez García, G. Rodríguez Zurita, L. García Lechuga, Measurement of mean thickness of transparent samples using simultaneous phase shifting interferometry with four interferograms, Applied Optics, 55(15) (2026): 4047-4051.
40. Jose-Rubén Sánchez-Aguilar, Ana Karen Reyes, Luis García-Lechuga, Areli Montes-Perez, Noel-Ivan Toto-Arellano1, Polarizing white light interferometry for phase measurements using two simultaneous interferograms, Applied Optics, 62(27), 2023, 7280-7287.
41. Noel-Ivan Toto-Arellano, Ana Karen Reyes, and José Escamilla Ángeles, "Polychromatic polarization-based shearing interferometry with channel-selective phase-gradient recovery," Appl. Opt. 65, 1437-1447 (2026).

42. Creath, Katherine. "Phase-shifting speckle interferometry." Applied Optics, vol. 24, núm. 18, pp. 3053-3058 (1985).
43. Schwider, J., Burow, R., Elssner, K.-E., Grzanna, J., Spolaczyk, R., y Merkel, K. B. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. Applied Optics, vol. 22, núm. 21, pp. 3421–3432 (1983).
44. D. C. Ghiglia y L. A. Romero, “Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods”, J Opt Soc Am, vol. 11, núm. 1, pp. 107–117, 1994.

SÍNTESIS POR EL MÉTODO PECHINI Y CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LA PEROVSKITA $SrZrO_3$

Hugo Rizo Navarro[1], Jacob Morales Bautista[1], Héctor Guillén Bonilla[1], Alex Guillén Bonilla[2], José Trinidad Guillén Bonilla[1] y María de la Luz Olvera Amador[3]

[1]Universidad de Guadalajara-Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, [2]Universidad de Guadalajara-Centro Universitario de los Valles, [3]Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Zacatenco
hector.guillen1775@academicos.udg.mx

RESUMEN

En este trabajo se reporta la síntesis de polvos de $SrZrO_3$ con estructura perovskita ortorrómbica mediante el método Pechini. El procedimiento de síntesis consistió en la preparación de tres soluciones precursoras: una de estroncio (Sr), una de zirconio (Zr) y una de etilendiamina, empleada como agente controlador de la morfología, utilizando agua como disolvente en todos los casos. Posteriormente, se añadió ácido cítrico a la solución de Zr para favorecer la formación del complejo metálico. Cada solución se mantuvo bajo agitación magnética durante 15 min y posteriormente se mezclaron entre sí. Finalmente, se incorporó etilenglicol de manera gradual a la solución resultante, la cual se mantuvo bajo agitación magnética durante 24 h a 40 °C con el fin de promover la polimerización del sistema precursor. El material obtenido se secó a 200 °C durante 8 h y posteriormente se calcinó en atmósfera de aire a 700, 800 y 900 °C durante 5 h. Los patrones de difracción de rayos X (XRD) confirmaron la formación de la fase cristalina correspondiente al $SrZrO_3$. A partir de los picos de difracción más intensos se estimó un tamaño promedio de cristalito cercano a 20 nm. Las propiedades morfológicas fueron estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), revelando nanoestructuras con geometría predominantemente cúbica y una longitud promedio de arista de aproximadamente 67 nm. Asimismo, la energía de banda prohibida se determinó mediante espectroscopía de reflectancia difusa UV-Vis. Los datos experimentales se analizaron empleando la función de Kubelka Munk y el método de Tauc, obteniéndose un valor de energía de banda prohibida de 5.2 eV, en concordancia con valores reportados en la literatura. Los resultados obtenidos demuestran que el método Pechini permite la síntesis de $SrZrO_3$ nanométrico con propiedades estructurales y ópticas acordes con lo reportado en la literatura, aportando información relevante para el estudio de este tipo de perovskitas.

INTRODUCCIÓN

Los materiales tipo perovskita han despertado un gran interés en la ciencia de materiales debido a su versatilidad estructural y a la amplia gama de propiedades físicas que presentan, lo que los hace adecuados para aplicaciones en catálisis, electrónica, materiales dieléctricos y más recientemente, en dispositivos fotovoltaicos y fotocatálisis [1]. El término perovskita describe una familia de compuestos que adoptan la estructura cristalina del mineral $CaTiO_3$, caracterizada por la fórmula general ABO_3, donde A y B son cationes de diferentes tamaños y X es un anión, generalmente oxígeno [2]. Esta estructura tridimensional, conformada por una red de octaedros BX_6 compartiendo vértices, confiere a estos materiales propiedades únicas que pueden ser ajustadas mediante la sustitución de cationes en los sitios A y B, así como por la modificación de las condiciones de síntesis [3].

En particular, el $SrZrO_3$ destaca por su alta estabilidad térmica, resistencia química y amplio band gap, lo que lo convierte en un material prometedor para aplicaciones como sensores de gases, celdas de combustibles, recubrimientos protectores y fotocatálisis [4, 5], sin embargo, su alto band gap, reportado de entre 4.2 a 5.96 eV limita su absorción de luz prácticamente a la región ultravioleta, lo cual representa un desafío para su aplicación bajo irradiación solar directa [5, 6].

El $SrZrO_3$ puede presentar distintas fases cristalinas dependiendo de la temperatura y de las condiciones de síntesis. A temperatura ambiente, comúnmente se reporta una estructura ortorrómbica perteneciente al grupo espacial D_{2H}^{16} Pnma, no obstante, algunos estudios también han reportado la presencia de una fase cúbica. Estas variaciones estructurales se han relacionado principalmente con diferencias en las condiciones de síntesis, así como con posibles defectos cristalinos y desviaciones estequiométricas. Además, en el intervalo aproximado de 700 °C a 1200 °C, el $SrZrO_3$ experimenta varias transiciones de fase, evolucionando de una estructura ortorrómbica hacia fases tetragonales intermedias y, finalmente, hacia una fase cúbica a temperaturas elevadas [7].

El método Pechini, desarrollado originalmente por Maggio Pechini en 1967, se basa en la formación de complejos quelatos metálicos mediante ácido cítrico, seguida de una reacción de polimerización con etilenglicol que genera una red polimérica tridimensional. Esta red permite homogeneizar la distribución de los precursores metálicos a nivel molecular [8]. En términos generales, entre los distintos métodos de síntesis, el método sol-gel tipo Pechini destaca por proporcionar una elevada homogeneidad química y un control preciso del tamaño de partícula a escala nanométrica. Además, favorece la obtención de fases cristalinas de alta pureza a temperaturas relativamente menores en comparación con métodos convencionales, como la reacción en estado sólido [9, 10].

En este trabajo, polvos de $SrZrO_3$ fueron sintetizados mediante el método sol-gel tipo Pechini, el cual permite una alta homogeneidad química y un adecuado control del tamaño de partícula. Para evaluar las propiedades del material sintetizado, se emplearon distintas técnicas de caracterización. La estructura cristalina, los parámetros de red y la fase cristalina se determinaron mediante difracción de rayos X (XRD), mientras que el tamaño promedio de cristalito se estimó a partir del ensanchamiento de los picos de difracción utilizando la ecuación de Scherrer. La caracterización micro y nanoestructural se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), permitiendo analizar la morfología, el tamaño y la distribución de partícula. Asimismo, la espectroscopía de dispersión de energía (EDS), acoplada al sistema SEM, se utilizó para determinar la composición elemental y verificar la homogeneidad química del material. Finalmente, la espectroscopía UV-Vis se empleó para estudiar sus propiedades ópticas del material. Los resultados obtenidos mostraron la formación adecuada de la fase cristalina y propiedades estructurales y ópticas de interés para potenciales aplicaciones tecnológicas.

TEORÍA

En el método Pechini, los cationes metálicos reaccionan inicialmente con el ácido cítrico formando complejos tipo citrato, lo que favorece una distribución homogénea de los precursores a nivel molecular y evita la segregación de fases durante el proceso de síntesis [8]. De manera general, el proceso de complejación puede representarse mediante [11]:

$$sal\ metalica + C_6H_8O_7 \rightarrow metal - citrato$$

Posteriormente, los complejos formados reaccionan con el etilenglicol mediante una reacción de poliesterificación, generando una red polimérica tridimensional que inmoviliza homogéneamente los cationes metálicos [11]:

$$metal - citrato + \ C_2H_6O_2 \rightarrow red\ polimerica + H_2O$$

Finalmente, durante el tratamiento térmico ocurre la descomposición de la red polimérica y la formación del óxido metálico correspondiente [11]:

$$Red\ polimerica + O_2 \rightarrow Oxido\ metálico + residuos\ gaseosos$$

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica ampliamente utilizada para la identificación de fases cristalinas y el análisis estructural de materiales. Su funcionamiento se basa en la interacción de la radiación X con los planos atómicos periódicamente ordenados del material. De acuerdo con la ley de Bragg, los rayos X incidentes sobre un cristal son reflejados por planos atómicos separados por una distancia d. La interferencia constructiva ocurre cuando la diferencia de trayectoria entre los

haces reflejados es igual a un múltiplo entero n de la longitud de onda λ, cumpliendo la relación $n\lambda = 2dsen(\theta)$, donde θ representa el ángulo de difracción. Esta condición genera los picos de difracción en el patrón de XRD, permitiendo la identificación de los materiales [12].

Además de la identificación estructural, el ensanchamiento de los picos de difracción puede relacionarse con el tamaño promedio de cristalito mediante la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)}$$

donde D representa el tamaño promedio de cristalito, Kes el factor de forma, β corresponde al ancho a media altura del pico de difracción y θ es el ángulo de Bragg [13].

La microscopía electrónica de barrido (SEM) permite estudiar la morfología superficial y el tamaño de partícula de materiales micro y nanométricos mediante la interacción de un haz de electrones con la superficie de la muestra. Esta interacción genera diferentes señales, principalmente electrones secundarios y retrodispersados, a partir de las cuales se obtienen imágenes de alta resolución. Adicionalmente, la espectroscopía de dispersión de energía (EDS), acoplada al sistema SEM, permite determinar la composición elemental del material mediante la detección de rayos X característicos emitidos por los elementos presentes en la muestra [14].

Por otra parte, las propiedades ópticas de los materiales semiconductores pueden estudiarse mediante espectroscopía UV-Vis de reflectancia difusa. En esta técnica, la radiación incidente sobre muestras en polvo se dispersa en múltiples direcciones debido a las irregularidades superficiales y a la interacción de la luz con las partículas del material. La reflectancia difusa obtenida puede relacionarse con el coeficiente de absorción óptica mediante la función de Kubelka-Munk [15]:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

donde R es la reflectancia difusa. Relacionando la ecuación de Tauc con la función de Kubelka-Munk obtenemos la siguiente relación:

$$(F(R)hv)^n = C[hv - Eg]$$

Donde n es un factor igual a 1/2 para transiciones directas y 2 para transiciones indirectas, Graficando $(F(R)hv)^2$ contra hv, se logra extraer con facilidad el ancho de banda prohibida [15].

PARTE EXPERIMENTAL

La síntesis del $SrZrO_3$ se llevó a cabo mediante el método sol-gel tipo Pechini, empleando como precursores nitrato de estroncio y oxinitrato de zirconio (IV) hidratado.

Inicialmente, se prepararon soluciones precursoras individuales disolviendo 0.47 g de nitrato de estroncio y 0.56 g de oxinitrato de zirconio (IV) hidratado en 5 mL de agua desionizada, respectivamente. Ambas soluciones se mantuvieron bajo agitación constante a 40 °C hasta su completa disolución. De manera paralela, se preparó una solución de ácido cítrico disolviendo 0.89 g en 5 mL de agua desionizada, bajo las mismas condiciones.

Posteriormente, la solución de ácido cítrico se añadió gradualmente a la solución de zirconio bajo agitación constante y tras 15 minutos se incorporó la solución de nitrato de estroncio, manteniendo la temperatura en 40 °C para asegurar la homogeneidad del sistema. Una vez obtenida una solución homogénea, se añadieron 0.25 mL de etilenglicol lentamente, promoviendo la formación de una red polimérica mediante reacciones de poliesterificación. Finalmente, se incorporaron 5 mL de etilendiamina a 4 mM con el objetivo de ajustar el pH del sistema y estabilizar los complejos metálicos en solución.

La solución resultante se sometió a un tratamiento térmico inicial a 200 °C para eliminar el solvente y favorecer la obtención de un precursor sólido. Posteriormente, el material seco fue triturado y sometido a tratamientos térmicos a 700, 800 y 900 °C, con el fin de inducir su cristalización.

Las muestras obtenidas fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X (XRD) utilizando un difractómetro Empyrean (PANalytical) para la identificación de fases cristalinas y el análisis estructural. La morfología y el tamaño de partícula se evaluaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un equipo JEOL JSM-IT710, mientras que la composición elemental se determinó mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS) acoplada al SEM. Asimismo, las propiedades ópticas se analizaron mediante espectroscopía UV-Vis en modo de reflectancia difusa empleando un espectrofotómetro JASCO, estimándose el ancho de banda prohibida mediante el método de Kubelka-Munk y gráficas de Tauc.

RESULTADOS

Análisis de la difracción de rayos X

La Figura 1 muestra los patrones de difracción de rayos X correspondientes a las muestras tratadas térmicamente a 200, 700, 800 y 900 °C. La indexación de los picos de difracción se realizó mediante el software X'Pert HighScore. En la muestra tratada a 200 °C, los picos observados correspondieron principalmente a fases secundarias y compuestos intermedios provenientes de los precursores, indicando que a esta temperatura no se ha llevado a cabo la formación de la fase cristalina deseada. Al incrementar la temperatura de calcinación a 700 °C, comenzaron a observarse picos asociados a la fase $SrZrO_3$, coexistiendo aún con fases secundarias residuales. Este comportamiento sugiere que el proceso de cristalización y formación de la perovskita es parcial a dicha temperatura, permaneciendo especies intermedias derivadas del proceso Pechini.

En contraste, la muestra calcinada a 800 °C presentó picos de difracción más intensos y definidos, evidenciando una mejora significativa en la cristalinidad del material. De acuerdo con el código PDF 96-152-8399 asignado por X'Pert HighScore, los picos de difracción corresponden a la fase cristalina de $SrZrO_3$ con estructura ortorrómbica, perteneciente al grupo espacial Pnma y con parámetros de red a = 5.79 Å, b = 8.19 Å y c = 5.82 Å [16]. Asimismo, se identificaron señales de baja intensidad asociadas a trazas de ZrO_2 y $SrCO_3$ residual, lo que indica que la reacción de formación de la perovskita no se completó totalmente. No obstante, la intensidad relativa de estas reflexiones fue considerablemente menor respecto a los picos principales de $SrZrO_3$.

Por otro lado, la muestra tratada a 900 °C exhibió un incremento adicional en la intensidad y nitidez de los picos de difracción, lo cual se relaciona con un mayor grado de cristalinidad y crecimiento cristalino. Sin embargo, no se observó una mejora significativa en la pureza de fase con respecto a la muestra calcinada a 800 °C, lo que sugiere que el aumento de temperatura favorece principalmente el crecimiento de cristalito más que la eliminación completa de fases residuales. Con base en estos resultados, la muestra tratada a 800 °C fue seleccionada para las caracterizaciones posteriores, debido a que presentó una adecuada combinación entre cristalinidad y pureza de fase.

El tamaño promedio de cristalito de la muestra calcinada a 800 °C fue estimado a partir del ensanchamiento de los picos de difracción mediante la ecuación de Scherrer, obteniéndose un valor aproximado de 26.7 nm, calculado a partir del promedio de los principales picos de difracción. En la literatura se ha reportado la síntesis de $SrZrO_3$ principalmente por el método de estado solido a altas temperaturas como 1250 [17], 1200 [16] o 1400 °C [18], sin embargo, en este estudio se logro obtener el $SrZrO_3$ a menores temperaturas con una cantidad mínima de fases secundarias. Este resultado se podría deber al método de síntesis ya que el método Pechini permite obtener óxidos multicomponente con alta homogeneidad química debido a la distribución molecular de los cationes dentro de una red polimérica, favoreciendo la formación de fases cristalinas a menores temperaturas de calcinación [19].

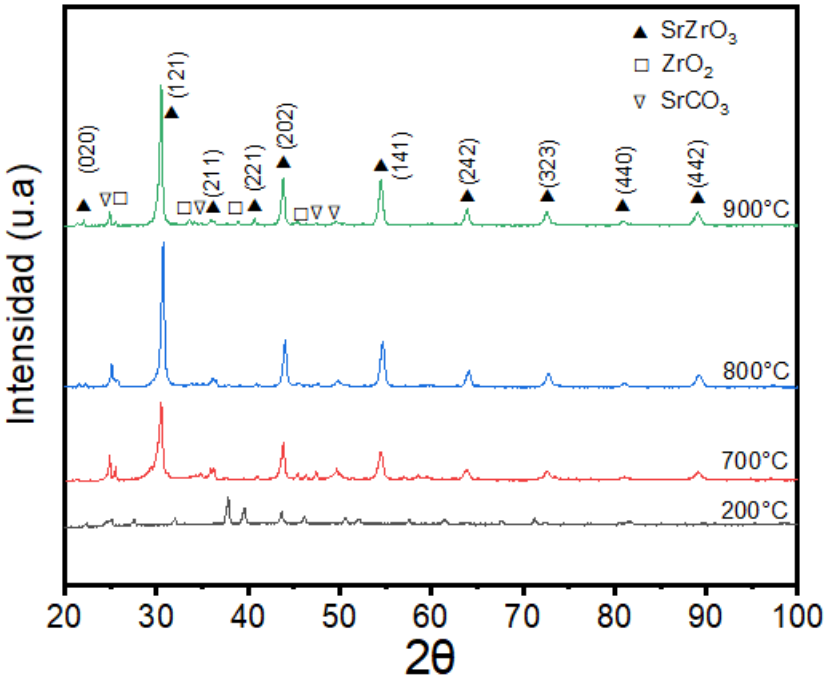


Figura 1. Difracción de rayos X de $SrZrO_3$ calcinado a diferentes temperaturas

Análisis morfológico mediante SEM

La morfología del material fue evaluada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las Figuras 2(a) y 2(b) corresponden a micrografías de la muestra calcinada a 800 °C, en tanto que la Figura 3(c) muestra el histograma de distribución del tamaño de arista. En la figura 2a-b se observa que el material exhibe una morfología predominantemente cúbica, con partículas que presentan bordes relativamente definidos y caras planas, características que sugieren un crecimiento controlado. Estas partículas tienden a agruparse, formando aglomerados compactos, lo cual es consistente con procesos de evolución microestructural inducidos por tratamientos térmicos a alta temperatura donde la difusión superficial y de volumen favorece la reducción del área interfacial y promueve la densificación del sistema [20, 21].

A partir del análisis estadístico de las micrografías, se estimó que la longitud promedio de las aristas de los nanocubos es del orden de 67 nm, el histograma de la figura 2(c) muestra una dispersión relativamente homogénea en la longitud de las aristas, indicando que existe cierta uniformidad morfológica.

Desde el punto de vista funcional, la morfología cúbica observada es particularmente relevante, ya que implica la exposición de las caras de los cubos que se aprecian bien definidas. Este aspecto puede influir de manera directa en las propiedades superficiales del material, especialmente en aplicaciones como la fotocatálisis o en el campo de los sensores de gases, donde la actividad depende de la interacción entre la superficie del sólido y las especies reactivas [22]. Sin embargo, el grado de aglomeración detectado podría tener un efecto contraproducente, al reducir el área superficial específica disponible y, por ende, la cantidad de sitios activos accesibles para reacciones superficiales [23].

En este trabajo las morfologías obtenidas las podemos atribuir al uso de la etilendiamina ($NH_2CH_2CH_2NH_2$), la cual es un ligando quelante, bidentado que puede enlazarse a iones metálicos a través de los 2 átomos de hidrogeno [24], este efecto reduce la concentración de iones metálicos presentes en la solución, como consecuencia, se modifica la velocidad de nucleación y crecimiento cristalino, favoreciendo el desarrollo de morfologías específicas [25]. Por ejemplo, mediante el uso de etilendiamina se han logrado obtener morfologías esféricas [26], estructuras tipo flor [27],

nanoalambres [28] e incluso partículas con facetas bien definidas y geometrías hexaédricas o cuasicúbicas [29]. La obtención de este tipo de morfologías es de gran interés debido a que la forma y el tamaño de las partículas influyen directamente en propiedades como el área superficial específica, la exposición de facetas cristalográficas activas y los procesos de transferencia de carga, factores que pueden impactar significativamente el desempeño funcional del material, particularmente en aplicaciones fotocatalíticas.

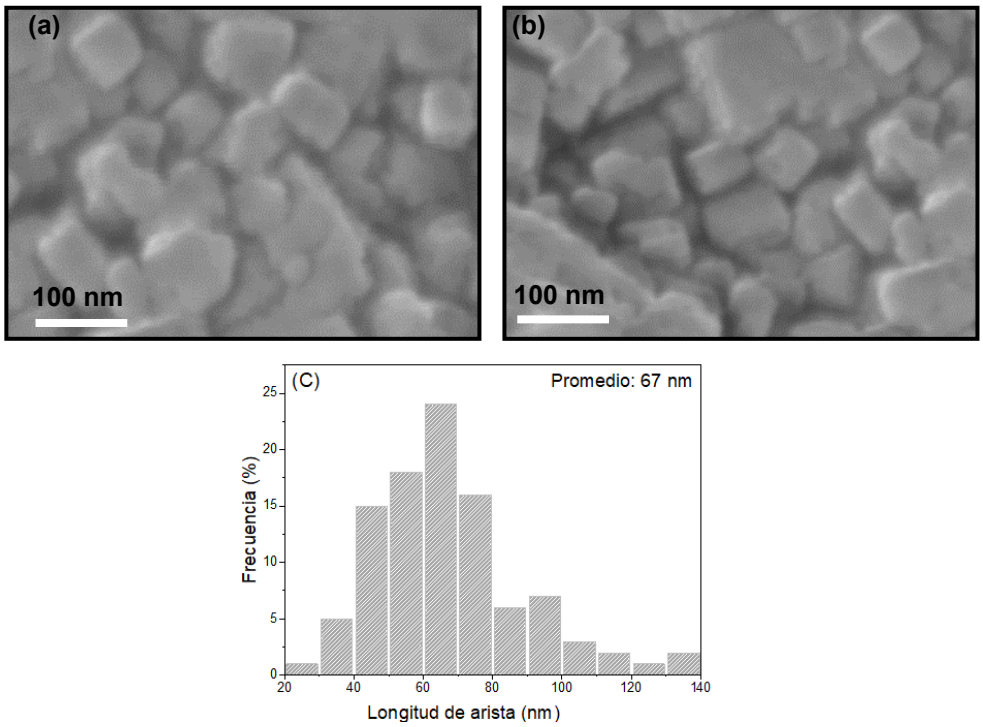


Figura 2. Micrografías SEM de $SrZrO_3$ calcinado a 800 °C: (a) y (b) imágenes obtenidas a 100000× de magnificación y (c) histograma de distribución de la longitud de arista de los nanocubos.

Análisis de composición elemental mediante SEM-EDS

La Figura 3 presenta el análisis EDS de la muestra de $SrZrO_3$, incluyendo la micrografía SEM del área analizada, el espectro EDS y la tabla de composición elemental. En el espectro EDS se identificaron claramente las señales características de Sr, Zr confirmando la presencia de los elementos constituyentes del material. El análisis cuantitativo indicó una relación Sr:Zr cercana a 1:1 (23.02 % y 25.42 % atómicos, respectivamente), consistente con la estequiometría esperada para $SrZrO_3$ [30]. En conjunto, estos resultados sugieren una adecuada homogeneidad química del material sintetizado. Adicionalmente, se detectó una pequeña cantidad de cloro (0.38 % en masa), atribuible a residuos de los precursores o del proceso de síntesis. No obstante, su baja concentración indica que no representa una contaminación significativa ni afecta de manera relevante la composición global del material.

En concordancia con los resultados de difracción de rayos X, el análisis EDS confirma la formación de $SrZrO_3$ con una composición cercana a la nominal, sin presencia de impurezas detectables en cantidades relevantes.

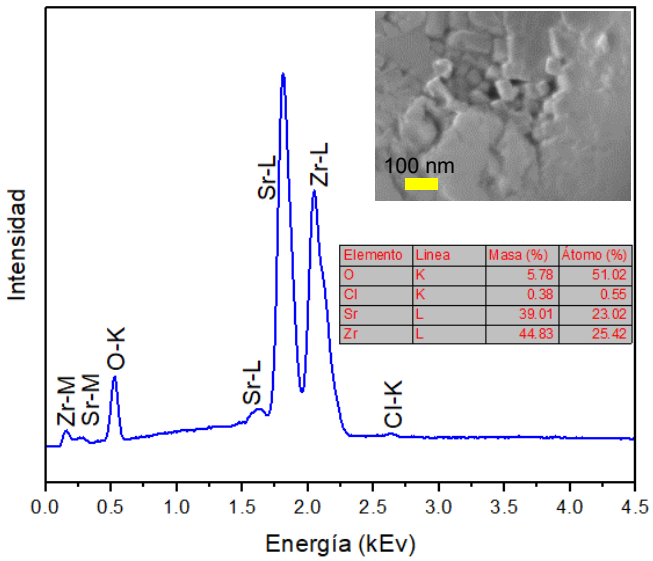


Figura 3. Composición elemental del $SrZrO_3$ calcinado a 800°C

Análisis de la caracterización óptica mediante UV-VIS

En cuanto a los resultados de la caracterización óptica, la Figura 4(a) muestra el espectro de reflectancia difusa UV-Vis del $SrZrO_3$ calcinado a 800 °C. Para la medición se emplearon longitudes de onda comprendidas entre 200 y 800 nm, lo que permitió analizar tanto la región ultravioleta como parte del visible. Para estimar la energía de banda prohibida, los datos de reflectancia difusa fueron transformados mediante la función de Kubelka-Munk, lo que permitió aplicar el método de Tauc. La Figura 4(b) presenta la gráfica de Tauc obtenida, a partir de la extrapolación lineal de la región de absorción, se estimó un valor de energía de banda prohibida de aproximadamente 5.2 eV, en concordancia con los valores reportados para $SrZrO_3$ en la literatura [31]. La contribución de las fases secundarias no fue significativa, sin embargo, en la figura 4(b) se observan ligeras contribuciones ópticas en la región entre 4.5 y 5.0 eV, las cuales podrían estar asociadas a defectos estructurales o a la presencia de pequeñas cantidades de fases secundarias. No obstante, la transición óptica principal corresponde claramente al $SrZrO_3$. Este valor de band gap indica que la absorción del $SrZrO_3$ ocurre principalmente en la región ultravioleta, lo que lo hace adecuado para aplicaciones fotocatalíticas bajo irradiación UV.

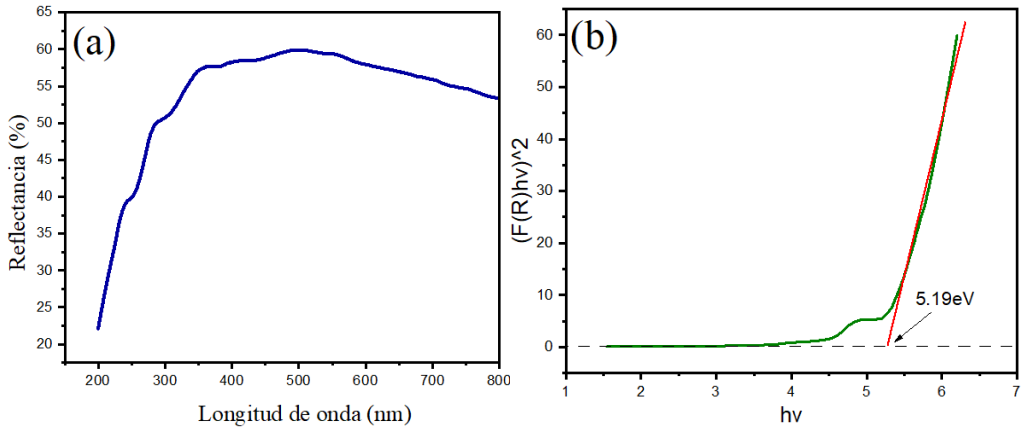


Figura 4. (a) espectro de reflectancia del $ZrSrO_3$ calcinado a 800°C y (b) grafico de Tauc para determinar el ancho de banda

CONCLUSIONES

La síntesis de la perovskita $SrZrO_3$ se llevó a cabo exitosamente mediante el método sol-gel tipo Pechini, obteniendo un material con buena homogeneidad química y control sobre sus propiedades estructurales. El análisis por difracción de rayos X confirmó la formación de la fase ortorrómbica característica del $SrZrO_3$, identificándose a 800 °C como la temperatura de calcinación óptima, al presentar la mayor pureza de fase y una notable disminución de fases secundarias.

El tamaño promedio de cristalito, estimado mediante la ecuación de Scherrer, fue de aproximadamente 26 nm, evidenciando la naturaleza nanocristalina del material. Los resultados obtenidos por microscopía electrónica de barrido revelaron partículas con morfología predominantemente cúbica con un tamaño promedio de arista de 67 nm. El análisis EDS indicó una adecuada estequiometría para $SrZrO_3$, sin presencia de contaminantes significativos, salvo trazas de cloro atribuibles a residuos del proceso de síntesis. Estos resultados corroboran la adecuada homogeneidad química del material.

Por otra parte, el análisis óptico mediante espectroscopía UV-Vis, a través del método de Kubelka-Munk y la gráfica de Tauc, permitió estimar un band gap de aproximadamente 5.2 eV, asociado a una transición electrónica directa. Este valor indica que el material presenta absorción en la región ultravioleta, lo que sugiere potencial aplicación en procesos fotocatalíticos bajo irradiación UV.
Adicionalmente, el método Pechini empleado se caracterizó por ser una ruta de síntesis relativamente sencilla, reproducible y con buen control de la estequiometría, lo que facilita la obtención de materiales homogéneos y representa una alternativa viable para la preparación de perovskitas con potencial de escalamiento.

En conjunto, los resultados demuestran que la temperatura de calcinación desempeña un papel determinante en la evolución estructural, microestructural y óptica del material. En particular, la condición de 800 °C favorece la obtención de $SrZrO_3$ con alta pureza de fase, adecuada cristalinidad y propiedades ópticas relevantes, posicionándolo como un material prometedor para aplicaciones en fotocatálisis.

BIBLIOGRAFÍA

1. S. Sisodiya, S. Rai, K. Ruhal, S. Nehra, and D. R. Paul, “A comprehensive review on perovskite catalysts for sustainable application,” Mol. Catal., Vol. 597, 2026, 115957.
2. E. A. R. Assirey, “Perovskite synthesis, properties and their related biochemical and industrial application,” Saudi Pharm. J., Vol. 27, 6, 2019, pp. 817-829.
3. F. Tayari, S. S. Teixeira, M. P. F. Graca, and K. I. Nassar, “A comprehensive review of recent advances in perovskite materials: Electrical, dielectric, and magnetic properties,” Inorganics, Vol. 13, 3, 2025, 67.
4. Y. Li, Y. Bai, Z. Li, Y. Gao, and W. Ma, “Infrared radiation and thermophysical properties of small band gap Cu-doped $SrZrO_3$ perovskite ceramic,” Ceram. Int., Vol. 50, 21, 2024, pp. 40993-41002.
5. A. M. Huerta Flores, L. M. Torres Martínez, E. Moctezuma, and J. E. Carrera Crespo, “Novel $SrZrO_3$-Sb_2O_3 heterostructure with enhanced photocatalytic activity: Band engineering and charge transference mechanism,” J. Photochem. Photobiol. A, Vol. 356, 2018, pp. 166-176.
6. M. Yoshino, Y. Liu, K. Tatsumi, I. Tanaka, M. Morinaga, and H. Adachi, “Energetics of hydrogen states in $SrZrO_3$,” Mater. Trans., Vol. 43, 7, 2002, pp. 1444-1450.
7. D. Souptel, G. Behr, and A. M. Balbashov, “$SrZrO_3$ single crystal growth by floating zone technique with radiation heating,” J. Cryst. Growth, Vol. 236, 2002, pp. 583-588.

8. C. Estrada-Moreno, F. Caballero-Briones, C. Guarneros-Aguilar, and M. Pacio-Castillo, “Síntesis por el método Pechini y caracterización estructural, óptica y termoeléctrica de $CuAlO_2$,” Superf. Vacío, Vol. 30, 3, 2020.
9. Z. Yao, U. Sasaki, X. Zhang, and L. Liu, “Pechini method revisited: From synthesis innovation to multifunctional materials,” Chem. Mater., Vol. 37, 21, 2025, pp. 8475-8485.
10. B. A. Puente-Urbina, L. A. García-Cerda, E. L. de León-Quiroz, and M. G. López-Martínez, “Nanopartículas de Ni/NiO y Cu-Ag obtenidas mediante el método de Pechini: síntesis y caracterización,” Superf. Vacío, Vol. 25, 3, 2012.
11. S. Esposito, “Sol-Gel synthesis strategies for tailored catalytic materials,” in Springer Brief in Materials (Springer, 2023), Chapter 5, pp. 49-51.
12. M. M. Khan, “Photocatalysts: Synthesis and characterization methods,” in Photocatalysts: Synthesis and Characterization Methods (Elsevier, 2025), Chapter 19, pp. 213-220.
13. A. O. Bokuniaeva and A. S. Vorokh, “Estimation of particle size using the Debye equation and the Scherrer formula for polyphasic TiO_2 powder,” J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 1410, 2019, 012057.
14. R. V. Curtis, T. F. Watson. Dental biomaterials imaging, testing and modelling,” in Dental Biomaterials Imaging, Testing and Modelling (ScienceDirect, 2008), Chapter 3, pp. 58-80.
15. S. S. Abdullahi, S. Güner, Y. Koseoglu, I. M. Musa, B. I. Adamu, and M. I. Abdulhamid, “Simple method for the determination of band gap of a nanopowdered sample using Kubelka Munk theory,” J. Niger. Assoc. Math. Phys., Vol. 35, 2016, pp. 241-246.
16. L. S. Cavalcante, A. Z. Simoes, J. C. Sczancoski, V. M. Longo, R. Erlo, M. T. Escote, E. Longo, and J. A. Varela, “$SrZrO_3$ powders obtained by chemical method: Synthesis, characterization and optical absorption behaviour,” Solid State Sci., Vol. 9, 2007, pp. 1020-1027.
17. B. Popescu, S. Enache, C. Ghica, and M. Valeanu, “Solid-state synthesis and spark plasma sintering of $SrZrO_3$ ceramics,” J. Alloys Compd., Vol. 509, 22, 2011, pp. 6395-6399.
18. C. E. Bracamonte-Estrada, R. Bernal, V. E. Álvarez-Montaño, and C. Cruz-Vázquez, “Effect of thermal annealing on the thermoluminescence stability of $SrZrO_3$ synthesized by solid-state reaction,” Appl. Radiat. Isot., Vol. 226, 2025, 112238.
19. M. Yoshimura, M. Kakihana, and K. Sardar, “A review on the designing of homogeneous multicomponent oxides via polymer complex method,” Mater. Des., Vol. 244, 2024, 113118.
20. A. Kocjan, M. Logar, and Z. Shen, “The agglomeration, coalescence and sliding of nanoparticles, leading to the rapid sintering of zirconia nanoceramics,” Sci. Rep., Vol. 7, 2017, 2541.
21. M. Maghsoodi and Z. Yari, “Effect of temperature on wet agglomeration of crystals,” Iran. J. Basic Med. Sci. vol 17, 2014, pp. 344-350.
22. X. Yan, Q. Gao, J. Qin, X. Yang, Y. Li, and H. Tang, “Morphology-controlled synthesis of Ag_3PO_4 microcubes with enhanced visible-light-driven photocatalytic activity,” Ceram. Int., Vol. 39, 8, 2013, pp. 9715-9720.
23. G. Li, L. Lv, H. Fan, J. Ma, Y. Li, Y. Wan, and X. S. Zhao, “Effect of the agglomeration of TiO_2 nanoparticles on their photocatalytic performance in the aqueous phase,” J. Colloid Interface Sci., Vol. 348, 2, 2010, pp. 342-347.
24. G. L. Miessler, P. J. Fischer, and D. A. Tarr, Inorganic Chemistry (Pearson, 5th ed.), Chapter 9, pp. 313-350.
25. A. Packter and D. F. Saunders, “Precipitation of sparingly soluble alkaline-earth and lead salts; the effects of chelating additives on nucleation and growth rates,” J. Chem. Soc. A, 1970, pp. 725-729.
26. X. Qi, X. Zhu, J. Wu, Q. Wu, X. Li, and M. Gu, “Controlled synthesis of $BiVO_4$ with multiple morphologies via an ethylenediamine-assisted hydrothermal method,” Mater. Res. Bull., Vol. 59, 2014, pp. 435-441.
27. L. Chen, H. Liu, L. Liu, Y. Zheng, H. Tang, and Z. Liu, “Growth and characterization of Ni nano-micro structures in the presence of ethylenediamine,” Crystals, Vol. 8, 11, 2018, 397.
28. S. Han, W. Liu, K. Sun, and X. Zu, “Experimental evidence of ZnS precursor anisotropy activated by ethylenediamine for constructing nanowires and single-atomic layered hybrid structures,” CrystEngComm, Vol. 18, 2016, pp. 2626-2631.
29. M. Zhao, A. O. Elnabawy, M. Vara, L. Xu, Z. D. Hood, X. Yang, K. D. Gilroy, L. F. Cosme, M. Chi, M. Mavrikakis, and Y. Xia, “Facile synthesis of Ru-based octahedral nanocages with ultrathin walls in a face-centered cubic structure,” Chem. Mater., Vol. 29, 2017, pp. 9227-9237.

30. L. Zhang, J. Wang, D. Peng, F. Long, S. Mo, Y. Wu, and Z. Zou, “Photoluminescence and dielectric properties of pure/Yb-doped $SrZrO_3$ crystals,” J. Phys. Chem. Solids, Vol. 104, 2017, pp. 1-7.
31. Z. Guo, B. Sa, B. Pathak, J. Zhou, R. Ahuja, and Z. Sun, “Band gap engineering in huge-gap semiconductor $SrZrO_3$ for visible-light photocatalysis,” Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 39, 5, 2014, pp. 2042-2048.

DETECCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS FÍSICOS Δx EN UN INTERFERÓMETRO DE MICHELSON MEDIANTE LA POSICIÓN DE CEROS EN EL PLANO COMPLEJO S

Romel Rubicel Flores Gámez[1], José Trinidad Guillen Bonilla[2], Héctor Guillen Bonilla[3], Alex Guillen Bonilla[4], María Eugenia Sánchez Morales[5]*

[1] Doctorado en Ingeniería, Centro Universitario de la Ciénega (CUCiénega), Universidad de Guadalajara, [2] Departamento de Electro-Fotónica, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, [3] Departamento de Ingeniería de Proyectos, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, [4] Departamento de Ciencias Computacionales e Ingenierías, Centro Universitario de los Valles (CUValles), Universidad de Guadalajara, [5] Departamento de Ciencias Tecnológicas, Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara.
eugenia.sanchez@academicos.udg.mx, romel.flores0627@alumnos.udg.mx

RESUMEN

En un interferómetro de Michelson, donde cualquier variación en la distancia recorrida por uno de los haces de luz en los brazos del interferómetro induce un cambio de longitud físico [1-5], denotado como Δx, como consecuencia directa de esta variación se genera un cambio en la Diferencia de Camino Óptico (DCO), alterando la fase de la señal resultante [6-9]. Este fenómeno se observa directamente en los interferogramas. Sin embargo, la detección puede verse limitada por ruido o ambigüedades en la fase y la metodología de demodulación de la señal. En este sentido, en este trabajo se propone la demodulación de la señal en el plano complejo s donde el fundamento de este método reside en el procesamiento de la función modulada del patrón de interferencia mediante la transformada de Laplace, la cual permite descomponer la señal en sus componentes de polos y ceros [10-12]. Usando la información de polos y ceros se definen los vectores referencia s_{ref} y perturbación s_{per} cuya diferencia es igual a un vector de medición s_{med}. Este último vector es aplicado para estimar la variación Δx. Es decir, el vector s_{med} es empleado para indicar la existencia de la perturbación en el interferómetro de Michelson.

Nuestro estudio radicó en la corroboración del cambio de longitud Δx basados en el vector s_{med}, el cual se calcula con la información de la posición de los ceros. Al analizar los resultados de las diferencias entre los datos reales y la teoría, se detectó que el margen de error es pequeño: se mantiene cerca del 0.0001% (10^-4%), específicamente, el error varía apenas entre el 0.00005% y el 0.00037%.

En conclusión, teórica y experimentalmente es confirmada la detección del parámetro Δx en el plano complejo s con un margen pequeño de error, el cual al ser tan diminuto indica que el sistema de medición es estable y se logró identificar por completo la perturbación introducida por el desplazamiento.

INTRODUCCIÓN

El interferómetro de Michelson destaca por su versatilidad experimental, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta fundamental para la medición de desplazamientos, la caracterización de superficies ópticas y la detección de fenómenos físicos sutiles. Su configuración básica, que involucra un divisor de haz y dos espejos reflectores perpendiculares, permite generar interferogramas cuya morfología está directamente relacionada con las diferencias de camino óptico entre los brazos del interferómetro [6-9].

Posteriormente, mediante técnicas de procesamiento de imágenes, se extrae el perfil del patrón de interferencia. Este perfil se somete a un proceso de filtrado para generar una función modulada que

preserva de manera íntegra la información de los desplazamientos físicos. Dicha información se analiza en el plano complejo s a través de la transformada de Laplace. En el ámbito de la interferometría, esta herramienta matemática permite representar los patrones de interferencia como funciones complejas, donde las variaciones del camino óptico se manifiestan como cambios en la distribución de polos y ceros [1, 13-14]. La principal ventaja de este método radica en su capacidad para convertir ecuaciones diferenciales complejas en expresiones algebraicas manejables, facilitando significativamente el estudio del comportamiento del sistema.

Experimentalmente, uno de los brazos del interferómetro fue desplazado desde 0.8 mm hasta 8.8 mm, causando una variación en la diferencia de camino óptico, y como una consecuencia, un cambio de fase en la función compleja modulada. Tal cambio se ve reflejado en el plano s a través de la posición de los ceros. Finalmente, usando a la información de los ceros es estimado un vector de medición, el cual es usado para determinar el valor de la perturbación en el plano s.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Siendo el objetivo realizar detecciones de variaciones de longitud Δx en el plano complejo s, se generan interferogramas usando el interferómetro de Michelson como se muestra en la Figura 1.

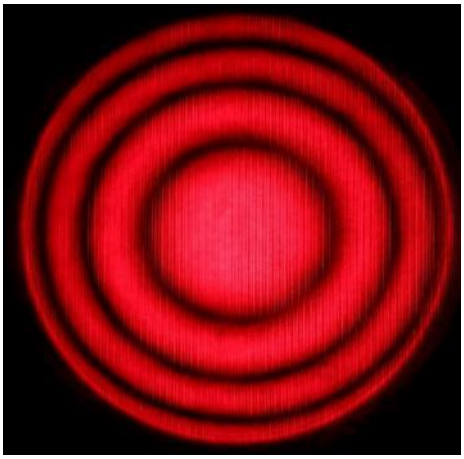


Figura 1. Interferograma generado con el interferómetro de Michelson con el espejo 2 a 14.3mm del divisor de haz.

El interferograma es una imagen plana de círculos concéntricos causado por la interferencia entre las dos ondas $\psi_1(x,y,t)$ y $\psi_2(x,y,t)$. Por su geometría, secciones transversales de la imagen pueden ser tomadas en cualquier dirección y la distancia entre los círculos seria la misma ya que son uniformes en el plano. Para obtener una ecuación unidimensional, la dependencia se mantiene en una dimensión, sobre el eje x, en este caso, el patrón de interferencia será

$I(x) = 2I_0(x)(1+\cos(\omega_o x))$	(1)

Donde ω_o es la frecuencia angular y el patrón de interferencia depende de la diferencia de camino óptico existente entre los dos haces de luz, los cuales forman el interferograma en el interferómetro de Michelson. De tal forma que, al modificar la distancia recorrida entre ambos haces de luz o un cambio de índice de refracción, se verá reflejado en la fase de la función trigonométrica $\cos()$.

El patrón de interferencia $I(x)$ es definida por la multiplicación entre dos funciones: envolvente $f_e(x) = 2I_0(x)$ y modulada $f_m(x) = (1+\cos(\omega_o x))$. La función envolvente $f_e(x)$ depende de la fuente de luz mientras que la función modulada $f_m(x)$ es generada por la interferencia entre ambos haz de luz en el interferómetro de Michelson.

Por otro lado, ya que la información de la diferencia de camino óptico define la frecuencia del patrón de interferencia y tal información no es contenida en la función envolvente, como una consecuencia, la función $f_m(x)$ puede filtrarse desde el patrón $I(x)$, tal que, la función $f_e(x)$ es eliminada con el

procesamiento de señal. En este caso, las variaciones de longitud Δx podrán detectarse en el plano s con la información de la función $f_m(x)$. Esto es posible porque esta función contiene toda la información acerca de la diferencia de camino óptico.

El proceso de filtrado de la función $f_m(x)$ desde el patrón $I(x)$ se describe en la Figura 2 donde se muestra de manera esquemática

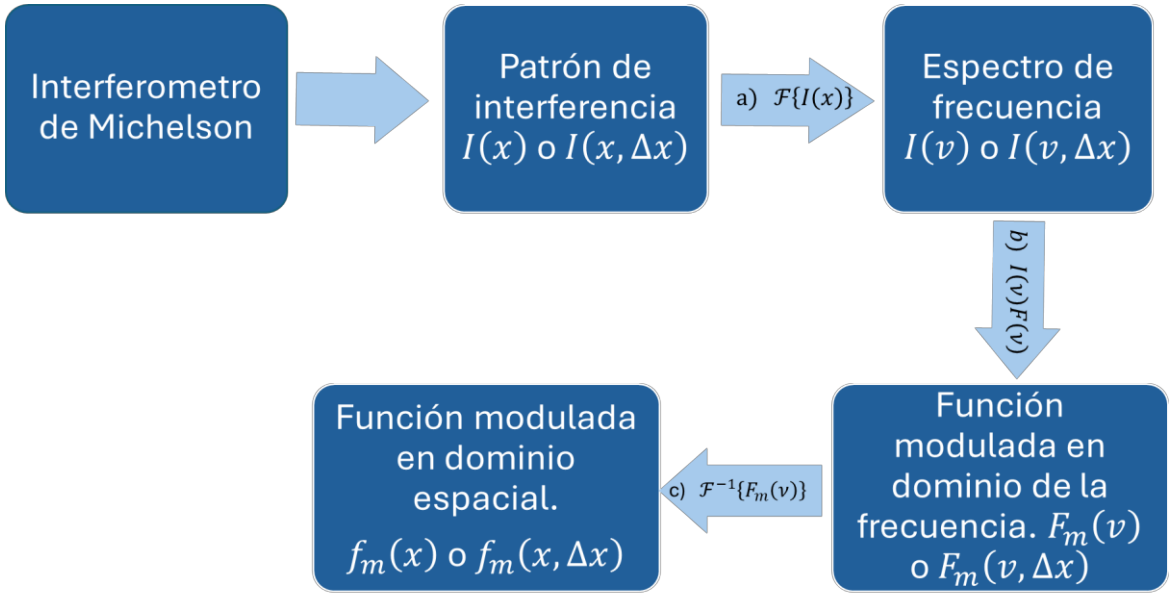


Figura 2. Representación esquemática sobre el filtrado de función $f_m(x)$ desde el patrón de interferencia $I(x)$.

la función modulada en el dominio del espacio es obtenida

$f_m(x) = 1 + \cos(\omega_o x).$	(2)

Ahora, si hay una perturbación es introducida en la forma de variación en la distancia recorrida por uno de los haces de luz, hay un cambio de longitud Δx, y como una consecuencia, hay un cambio en la diferencia de camino óptico ΔDCO, tal que, el interferograma se ve modificado como se muestra en la Figura 3,

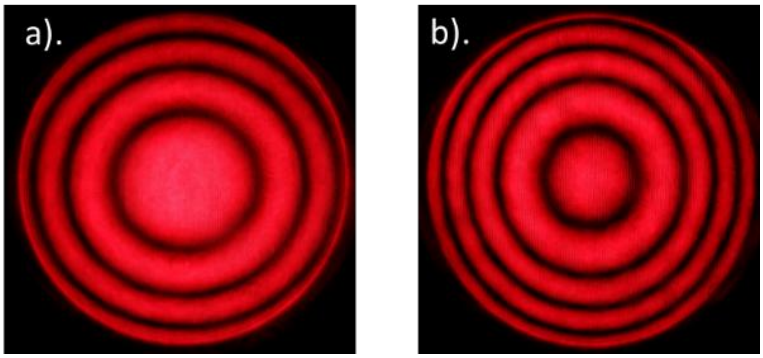


Figura 3. Interferogramas generados con el interferómetro de Michelson. a) con el espejo 2 a 14.3mm del divisor de haz y b) con el espejo 2 a 15.1mm del divisor de haz

Entonces para el interferograma de la Figura 3b la Ecuación (2) puede expresarse como

$f_m(x,\Delta x) = 1 + \cos\big(\omega_0(x-\Delta x)\big),$	(3)

Siendo $f_m(x, \Delta x)$ la función modulada debido a la variación de longitud Δx. Es decir, el cambio Δx afecta al argumento de la función trigonometría con un corrimiento.

La transformada de Laplace es aplicada en el análisis dinámico de sistemas como el interferómetro de Michelson gracias a que tiene la característica de ser una transformación lineal que durante el proceso no pierde información de la señal y al calcular la inversa de la transformada de Laplace se recupera completamente la señal.

Para determinar la función compleja $F(s)$, que se usa como referencia, se calcula la transformada de Laplace unilateral del patrón de interferencia en el interferómetro de Michelson

$$F(s) = \int_0^\infty [1 + \cos(\omega_o x)] e^{-sx} dx \quad (4)$$

cuya solución reducida a su última expresión es

$$F(s) = \frac{2s^2 + \omega_o^2}{s(s^2 + \omega_o^2)}. \quad (5)$$

La Ecuación (5) corresponde a la función compleja cuando el interferómetro Michelson no tiene perturbaciones en ninguno de sus brazos.

En caso contrario, cuando la función compleja tiene perturbación, $F(s, \Delta x)$ se estima calculando la transformada de Laplace unilateral para cambios en la longitud Δx,

$$F(s, \Delta x) = \int_0^\infty \left[1 + \cos\left(\omega_0 (x - \Delta x)\right)\right] e^{-sx} dx. \quad (6)$$

Utilizando cambios de variables, varias propiedades y herramientas matemáticas se llega a la solución

$$F(s, \Delta x) = \frac{\Delta x s^3 + 2s^2 + \omega_o^2}{s(s^2 + \omega_o^2)}, \quad (7)$$

La Ecuación (7) corresponde a la función modulada cuando el interferómetro experimenta una perturbación Δx, este cambio físico se ve reflejado en el plano complejo s.

La posición de los polos en el plano complejo s no cambia, independientemente de si el interferómetro está perturbado o no como se observa en la Figura 4a y 4b. Por otro lado, se observa en la Figura 4b que la posición de los ceros sí se ve afectada cuando el interferómetro es perturbado por una variable externa, en este caso por el corrimiento Δx, debido a un cambio en la diferencia de camino óptico.

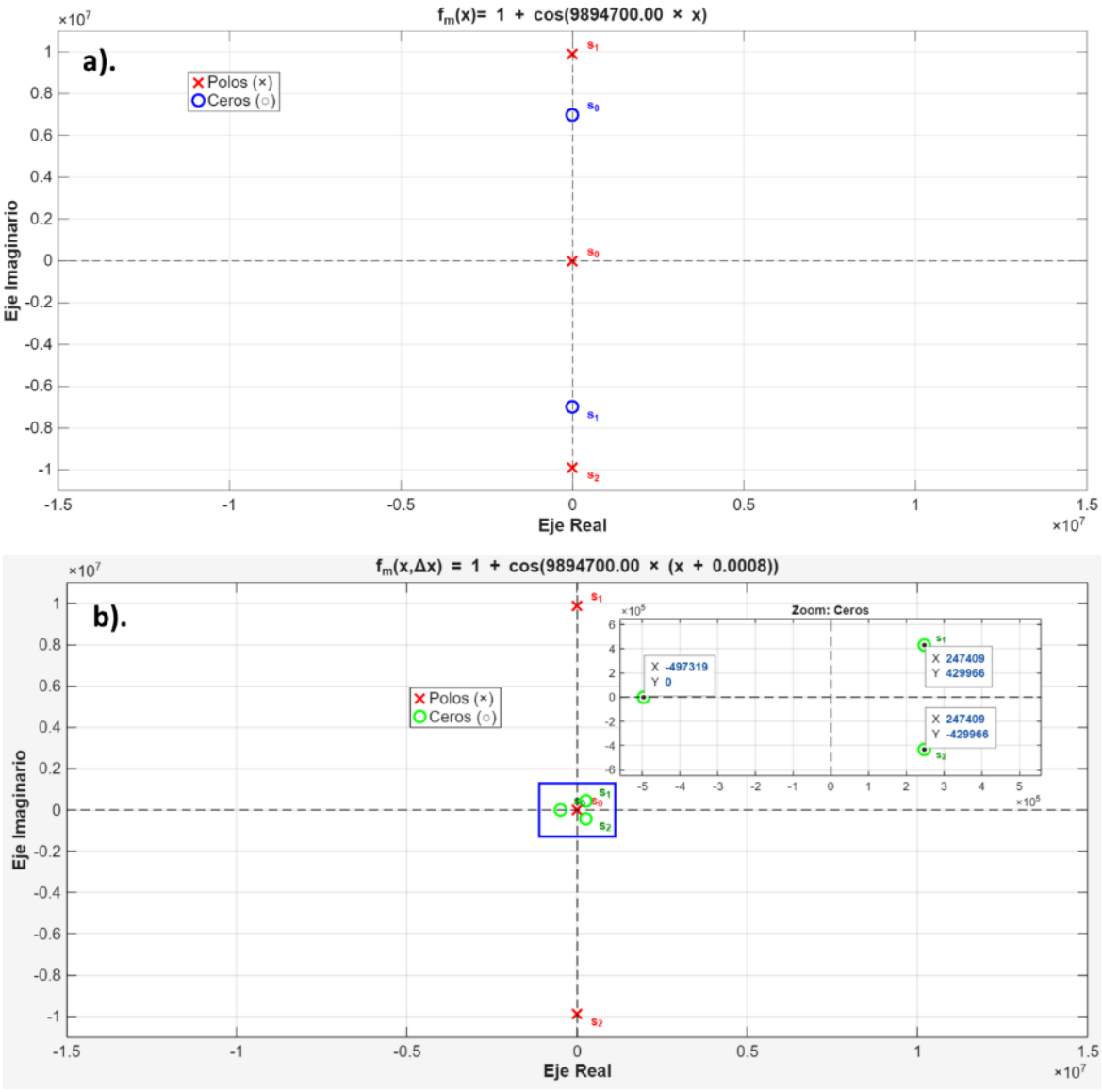


Figura 4. Mapa de polos y ceros de funciones complejas: a) mapa de la función sin perturbación. b) mapa de la función con perturbación.

Usando la información de los polos y ceros se definen los vectores referencia s_{ref} y perturbación s_{per} cuya diferencia es igual a un vector de medición s_{med}.

$$s_{med} = s_{ref} - s_{per} \quad (8)$$

El vector s_{med} es aplicado para estimar la variación Δx. Es decir, el vector s_{med} es empleado para indicar la existencia de la perturbación en el interferómetro de Michelson.

Con los datos obtenidos comparando una referencia y 4 diferentes interferogramas perturbados se crea la Tabla 1 en donde se observa cómo están construidos los vectores y como es obtenido el vector de medición s_{med}

Tabla 1. Cálculos para el vector de medición s_{med} en ceros

Caso	Vector s_{ref}		Vector s_{per}		Vector s_{med}
	Parte Real	Parte imaginaria	Parte Real	Parte imaginaria	

1	0	$6.9966\text{x}10^6 i$	-497318	0	$497318+6.9966\text{x}10^6 i$
2	0	$6.9966\text{x}10^6 i$	-372472	0	$372472+6.9966\text{x}10^6 i$
3	0	$6.9966\text{x}10^6 i$	-331236	0	$331236+6.9966\text{x}10^6 i$
4	0	$6.9966\text{x}10^6 i$	-223317	0	$223317+6.9966\text{x}10^6 i$

Los vectores de medición s_{med} calculados en la Tabla 1 se representan gráficamente en la Figura 5 mediante diagramas vectoriales en el plano complejo, estas representaciones permiten visualizar la relación espacial entre el vector de referencia s_{ref} y los vectores perturbados s_{per}. El vector de medición s_{med}, mostrado en cada diagrama, cuantifica la diferencia entre ambos ceros.

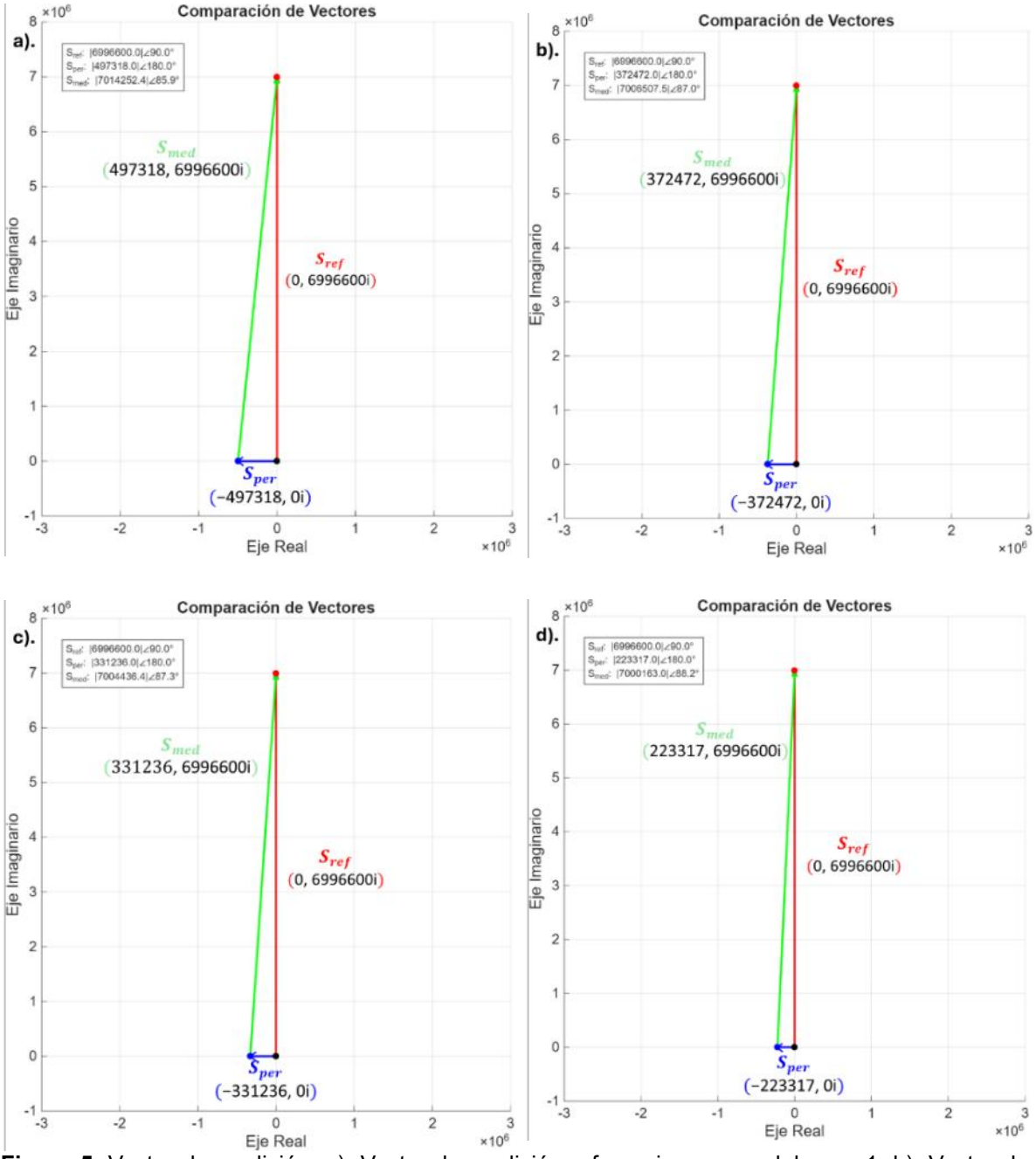


Figura 5. Vector de medición: a). Vector de medición referencia y ceros del caso 1. b). Vector de medición referencia y ceros del caso 2. c). Vector de medición referencia y ceros del caso 3. d). Vector de medición referencia y ceros del caso 4

RESULTADOS

Para cuantificar la variación Δx ocasionada por el cambio de posición de los espejos en el arreglo óptico, se emplearon las componentes reales extraídas del vector de medición, denotado como s_{med}, estos valores empíricos fueron sustituidos directamente en la ecuación mediante el despeje algebraico de la variable Δx, la cual representa el desplazamiento físico.

$$|\Delta x| = \frac{-{\omega_0}^2 - 2 \cdot {s_{med}}^2}{{s_{med}}^3} \quad (9)$$

Este procedimiento analítico no solo permite calcular el valor exacto del desplazamiento a partir de los datos experimentales, sino también corroborar la precisión y viabilidad del método de medición empleado frente al comportamiento físico real de los espejos.

A partir de la Ecuación (9) se elaboró la Tabla 2 en donde se muestran los resultados obtenidos para cada parte real del vector de medición.

Tabla 2 Cálculos para Δx

Caso	Parte real del vector s_{med}	${s_{med}}^2$	${s_{med}}^3$	ω_0	${\omega_0}^2$	$\lvert\Delta x\rvert$
1	497318	2.47325×10^{11}	1.22999×10^{17}	9894700	9.79051×10^{13}	0.000800003
2	372472	1.38735×10^{11}	5.1675×10^{16}	9894700	9.79051×10^{13}	0.001899999
3	331236	1.09717×10^{11}	3.63423×10^{16}	9894700	9.79051×10^{13}	0.002700007
4	223317	49870482489	1.11369×10^{16}	9894700	9.79051×10^{13}	0.008799989

Con estos datos corroboramos la distancia física que se desplazó el espejo y la distancia calculada mediante el vector s_{med} ,en la Tabla 3 se observa el porcentaje de error que existe entre el desplazamiento físico y el calculado

Tabla 3 porcentaje de error entre desplazamientos

Caso	Δx fisico	Δx calculado	% de error
1	0.0008	0.000800003	0.00037
2	0.0019	0.001899999	0.00005
3	0.0027	0.002700007	0.00026
4	0.0088	0.008799989	0.00013

CONCLUCIÓN

Los resultados demuestran que el sistema funciona exactamente como se predijo, la teoría y la práctica coinciden con precisión, lo que confirma que, tanto el modelo matemático como el método para procesar las señales son correctos.

De acuerdo con la Tabla 3, se compararon los datos medidos en el interferómetro con las predicciones teóricas y los datos del vector de medición, al analizar los resultados de las diferencias entre los datos reales y la teoría, se detectó que el margen de error es pequeño: se mantiene cerca del 0.0001% (10^{-4}%), específicamente, el error varía apenas entre el 0.00005% y el 0.00037%.

En conclusión, teórica y experimentalmente es confirmada la detección del parámetro Δx en el plano complejo s con un margen pequeño de error, el cual al ser tan diminuto indica que el sistema de medición es estable y se logró identificar por completo la perturbación introducida por el desplazamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Guillen Bonilla, J.T.; Guillen Bonilla, H.; Rodríguez Betancourtt, V.M.; Sánchez Morales, M.E.; Reyes Gómez, J.; Casillas Zamora, A.; Guillen Bonilla, A. Low-Finesse Fabry–Pérot Interferometers Applied in the Study of the Relation between the Optical Path Difference and Poles Location. *Sensors* 2020, *20*, 453. https://doi.org/10.3390/s20020453

2. Vázquez-Sánchez, R.; Kuzin, E.; García-Lara, C.; May-Alarcón, M.; Camas-Anzueto, J.; Righini, G.C.; Miridonov, S. Radio-frequency interrogation of a fiber Bragg grating sensor in the configuration of a fiber laser with external cavities. *Optik* 2010, *121*, 2040–2043. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2009.06.006

3. Xiong, C.; Wan, W.; Chen, J.; Zeng, D.; Cai, M. Fast high-precision displacement measurement system based on fringe image analysis techniques. *Results Phys.* 2020, *17*, 103048. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103048

4. Suchita, R.V. Effect of source spectral width and its temporal coherence in the interference pattern of a Mach–Zehnder interferometer. *Opt. Commun.* 2017, *402*, 478–482. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.06.063

5. Born, M.; Wolf, E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1999; p. 256. https://doi.org/10.1017/CBO9781139644181

6. Liu, Y.-C.; Lo, Y.-L.; Liao, C.-C. Compensation of non-ideal beam splitter polarization distortion effect in Michelson interferometer. *Opt. Commun.* 2016, *361*, 153–161. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.099

7. Ling, S.J.; Sanny, J.; Moebs, W. 3.5 El interferómetro de Michelson. In *Física Universitaria Volumen 3*; OpenStax: Houston, TX, USA, 2021; pp. 136–140.

8. Arosa, Y.; López-Lago, E.; de la Fuente, R. Spectrally resolved white light interferometer for measuring dispersion in the visible and near infrared range. *Measurement* 2018, *122*, 6–13. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.012

9. Zhang, W.; Li, P.; Qi, Z.; Zhang, J.; Liu, Y.; Zhang, Y. Large-dynamic range and high-stability phase demodulation technology for fiber-optic Michelson interferometer sensors. *Sensors* 2022, *22*, 2488. https://doi.org/10.3390/s22072488

10. Zhu, W.; Zhang, W.-T.; He, Y.-F.; Qu, W. Performance Evaluation of Azimuth Offset Method for Mitigating the Ionospheric Effect on SAR Interferometry. *J. Sens.* 2017, *2017*, 10. https://doi.org/10.1155/2017/4587475

11. Marian, D. Laplace transform and Semi-Hyers-Ulam-Rassias stability of some delay differential equations. *Mathematics* 2021, *9*, 3260. https://doi.org/10.3390/math9243260

12. Ortigueira, M.D. A new series representation and Laplace transform for the Lognormal distribution. *Mathematics* 2022, *10*, 3474. https://doi.org/10.3390/math10193474

13. Guillen Bonilla, J.T.; Guillen Bonilla, A.; Rodríguez Betancourtt, V.M.; Guillen Bonilla, H.; Jiménez Rodríguez, M.; Sánchez Morales, M.E.; Casillas Zamora, A. A theoretical-practical study on poles and zeros calculated from a filtered modulated function of an interference pattern. *Results Phys.* 2021, *27*, 104534. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104534

14. Pan, H.; Qu, X.; Shi, C.; Zhang, F.; Li, Y. Resolution-enhancement and sampling error correction based on molecular absorption line in frequency scanning interferometry. *Opt. Commun.* 2018, *416*, 214–220. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.02.006

BÚSQUEDA DE UN CANDIDATO DE MATERIA OSCURA LIGERA MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

María del Rocío Aparicio Méndez[1], José Enrique Barradas Guevara[2], Olga Guadalupe Félix Beltrán[1], Félix Francisco González Canales[1], Carlos Gerardo Honorato Méndez[1], Moisés Zeleny Mora[3]

[1]Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, [2]Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, [3]Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México

mariadelrocio.aparicio@correo.buap.mx

RESUMEN

En este trabajo proponemos el estudio de un candidato a materia oscura en el marco de un modelo extendido en los sectores fermiónico y de Higgs. Esta es una extensión del Modelo Estándar que incluye un neutrino $\boldsymbol{N}$ y un campo fermiónico singlete χ, el cual se propone como candidato a materia oscura, más un campo singlete escalar σ que viola la conservación del número leptónico (νSSM). Para ello consideramos el mecanismo de subibaja (seesaw) inverso, donde la masa de los neutrinos ν y $\boldsymbol{N}$, se hace dinámica por el escalar singlete σ. Ya que la escala natural para el valor de expectación de vacío escalar está cerca de la escala débil, nos enfocamos en la posibilidad de que el escalar singlete se conecte con la materia oscura, es decir, el escalar también es el mediador entre el sector oscuro y el contenido de materia del Modelo Estándar. Específicamente, nos interesa materia oscura ligera con masas menores que $\boldsymbol{O(1\ GeV)}$, así como explorar su estabilidad. La matriz de masas de los neutrinos $\boldsymbol{M}$ en la base $\{\nu, \boldsymbol{N}, \chi\}$ depende de los acoplamientos de Yukawa $\boldsymbol{Y}_{\nu,\chi}$, los cuales toman valores numéricos en el intervalo $[\boldsymbol{10^{-10}, 0.1}]$, así como de $\boldsymbol{m_N}$~$\boldsymbol{1}$ TeV y de $\boldsymbol{m_\chi}$~$\boldsymbol{1 - 1000}$ GeV. Realizamos un análisis numérico sobre el espacio de parámetros sujeto a las restricciones de detección indirecta y directa. Identificamos el neutrino más ligero con el candidato a materia oscura; comparando los resultados con los datos teóricos y experimentales reportados en la literatura, se obtiene el candidato de materia oscura con $\boldsymbol{m\chi \approx O(1\ eV)}$ y que la suma de las masas de los neutrinos ν, χ rebasa los 50 eV e incluso los GeV, cuando $\boldsymbol{Y\nu \to 0}$.

INTRODUCCIÓN

Los neutrinos provenientes del sol han jugado un papel muy importante en la física de partículas. Gracias a ellos se ha podido explicar exitosamente el espectro continuo de la energía en la desintegración beta, así como la discrepancia entre el Modelo Estándar Solar y el Modelo Estándar de las Partículas Elementales (SM, por sus siglas en inglés) [1]. La teoría que mejor ha descrito cómo interactúan las partículas elementales es el ME, sin embargo, esta es una teoría en proceso de elaboración, ya que no se puede explicar el fenómeno observado de oscilación de neutrinos y/o la violación de CP leptónica [2].

Por otra parte, evidencias observacionales indican la existencia de una mayor cantidad de masa en galaxias y cúmulos de galaxias de la que nosotros podemos ver en las estrellas y el gas cósmico. El enigma de la masa faltante ha sido un problema desde que Zwicky en 1933 midió las masas de sistemas extragalácticos [3]. Dadas las evidencias de la dinámica galáctica (curvas de rotación), cúmulos de galaxias, formación de estructura, así como de la nucleosíntesis del Big-Bang y la radiación cósmica de fondo, se sugiere que los bariones únicamente pueden explicar 1/6 de la materia, la mayoría de la masa faltante debe ser no bariónica.

Por otra parte, evidencias observacionales indican la existencia de una mayor cantidad de masa en galaxias y cúmulos de galaxias de la que nosotros podemos ver en las estrellas y el gas cósmico. El enigma de la masa faltante ha sido un problema desde que Zwicky en 1933 midió las masas de sistemas extragalácticos [3]. Dadas las evidencias de la dinámica galáctica (curvas de rotación),

cúmulos de galaxias, formación de estructura, así como de la nucleosíntesis del Big-Bang y la radiación cósmica de fondo, se sugiere que los bariones únicamente pueden explicar 1/6 de la materia, la mayoría de la masa faltante debe ser no bariónica.

Estudiamos a un candidato a materia oscura en el marco de un modelo extendido en los sectores fermiónico y de Higgs. Dicho candidato propuesto se incluye como un campo fermiónico singlete $\boldsymbol{\chi}$, el cual, junto con un neutrino $\boldsymbol{N}$ más un campo singlete escalar σ, que viola la conservación del número leptónico ($\boldsymbol{\nu}$SSM), conforman una extensión del SM. Para ello, se considera el mecanismo de subibaja (seesaw) inverso [Uttayarat], donde el escalar singlete $\boldsymbol{\sigma}$ interactúa con la masa de los neutrinos adicionales $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$. Ya que la escala natural para el valor de expectación de vacío escalar está cerca de la escala débil, se examina que el escalar singlete conecte con la materia oscura, es decir, el escalar también es el mediador entre el sector oscuro y el SM.

TEORÍA

EL MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

El Modelo Estándar es la teoría que mejor explica la Física de Partículas, así como de sus interacciones. Su principio básico es la invariancia de norma, la cual pone en el mismo cuadro a las partículas que conforman la materia, con sus interacciones y sus mediadores: los bosones de norma. Este modelo está basado en el grupo de simetría de norma [4]:

$$\boldsymbol{G_{ME}} = \boldsymbol{SU(3_C)\otimes SU(2)_L\otimes U(1)_Y}, \tag{1}$$

que es el producto de los grupos de simetría $\boldsymbol{SU(3_C)}$, de las interacciones fuertes, y $\boldsymbol{SU(2)_L\otimes U(1)_Y}$ de las interacciones electrodébiles. En este último grupo, se encuentra como un subgrupo, el de las interacciones electromagnéticas $\boldsymbol{U(1)_{EM}}$; lo que unifica ambas fuerzas.

El modelo consta con 12 partículas fermiónicas: 6 quarks ($\boldsymbol{u, d, c, s, t, b}$) y 6 leptones ($\boldsymbol{e, \mu, \tau}$ con sus respectivos neutrinos). Así como con 14 partículas bósonicas encargadas de las cuatro fuerzas de la naturaleza: portadores de la fuerza fuerte o carga de color, están los 8 gluones; conductores de la fuerza electrodébil son el fotón (encargado de las interacciones electromagnéticas) y los bosones $\boldsymbol{Z^0}$, $\boldsymbol{W^{\pm}}$ (encargados de las interacciones débiles). El gravitón como portador de la fuerza de gravedad y el cual aún no se detecta en colisionadores y el bosón de Higgs, encargado de dar masa a las partículas. Existen seis "sabores" de quarks, las cuales son clasificadas de acuerdo con su carga, encanto *c* (*charm*), extrañeza *s* (*strangeness*), cima *t* (*top*) y fondo *b* (*bottom*). Estos están divididos en tres familias o generaciones. También existen seis antiquarks con los signos invertidos. Además, cada quark y antiquark tiene uno de los tres "colores". En total, existen 36 quarks distintos.

Similarmente, existen seis leptones clasificados de acuerdo con su carga $\boldsymbol{Q}$, número electrónico $\boldsymbol{L_e}$, número muónico $\boldsymbol{L_\mu}$ y número tauónico $\boldsymbol{L_\tau}$. Estos también están divididos en tres familias: Nuevamente, al invertir los signos se pueden apreciar los seis antileptones. El positrón, por ejemplo, lleva una carga +1 y con número electrónico -1. Por lo que, en total, existen 12 leptones.

Estos fermiones constan con dos estados de helicidad, izquierdo y derecho, $\boldsymbol{\psi_{R,L} = (1/2)(1 \pm \gamma_5)\psi}$.

Ambos se simbolizan de distinta forma bajo el grupo $\boldsymbol{SU(2)_L}$. A los componentes izquierdos se les representa por medio de dobletes, mientras que a los derechos con singletes. Las otras dos familias se escriben similar, pero con sus respectivas partículas. Es impresionante pensar que, para crear la materia como la conocemos, ¡únicamente se necesita de la primera familia de fermiones! Dado que los componentes izquierdos y derechos se representan de distinta manera, no es posible escribir el término de masa con ellos y tampoco lo es para los bosones. De lo contrario, se podría romper la invariancia de norma y por lo tanto, la renormalización de la teoría. Es por lo que, para prevenir esto, es necesario introducir un mecanismo que conserve la invariancia de norma de la lagrangiana. Esto se logra con un mecanismo que rompe espontáneamente la simetría, el aclamado mecanismo de

Higgs. Más adelante se explicará que para los neutrinos derechos se puede escribir un término de masa de Majorana $\boldsymbol{\psi^{\mathrm{T}} C \psi}$, el cual es invariante de norma.

NEUTRINOS

Entre los bloques elementales constructores de materia, los neutrinos son únicos, en el aspecto en que no tienen carga eléctrica. Gracias a esta característica, tienen interacciones débiles y pueden atravesar la materia sin salir afectados; de esta forma, prueban ser constituyentes del Universo temprano. Su origen proviene de fuentes naturales como la fusión nuclear interna del Sol, las interacciones de rayos cósmicos con la atmósfera terrestre, la radioactividad natural de la Tierra y explosiones de supernovas, sin mencionar los producidos por el mismo Big Bang [5].

En el SM se tienen tres neutrinos, uno por cada familia, con quiralidad puramente izquierda y sin masa; lo que equivale a la conservación del número leptónico ($\boldsymbol{L}$). Existe un "sabor" de neutrino para cada leptón de cada familia del ME. El primero es el del electrón $\boldsymbol{\nu_e}$, siguiéndole el del muón $\boldsymbol{\nu_\mu}$ y por último el del tau $\boldsymbol{\nu_\tau}$.

En estos constructores de materia, existen dos tipos de fermiones: de Dirac y de Majorana. Un fermión de Majorana es aquel que es su propia antipartícula y el concepto fue formulado por E. Majorana en 1937 [6]. Mientras tanto, los fermiones de Dirac son aquellos que no son sus propias antipartículas. A excepción de los neutrinos en el ME, ninguna partícula elemental es su propia antipartícula; lo que nos indica que se espera que estos sean del tipo Majorana sin importar el mecanismo utilizado para describir su adquisición de masa.

Matemáticamente, un espinor de Dirac puede ser escrito como espinores de dos componentes, $\boldsymbol{\chi}$ y $\boldsymbol{\varphi}$ [7]:

$$\boldsymbol{\psi_D} = [\boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{i\sigma^2\varphi}\,*]^{\mathrm{T}}, \tag{2}$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es una matriz de Pauli y

$$\boldsymbol{\chi} = \left(\frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\right)(\boldsymbol{\rho^1} + \boldsymbol{i\rho^2}), \boldsymbol{\varphi} = \left(\frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{2}}}\right)(\boldsymbol{\rho^1} - \boldsymbol{i\rho^2}), \tag{3}$$

siendo $\boldsymbol{\rho}$ un espinor que obedece la ecuación de onda de Klein-Gordon.

De esta manera, el fermión de Dirac se muestra equivalente a dos fermiones de Majorana de misma masa. En esta tesis, se considera un modelo en el que las masas de los neutrinos aparecen en ausencia de los singletes del grupo $\boldsymbol{SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y}$, los llamados "*neutrinos derechos*". Una muy buena aproximación es el modelo *seesaw* de gran escala. Para $\boldsymbol{n}$ neutrinos del tipo Majorana, la matriz de mezcla de los leptones tiene la forma:

$$\boldsymbol{V^{LEP}} = \boldsymbol{\omega^0(\alpha)\prod(i<j)\omega_{ij}(n_{ij})\omega_0^{\dagger}(\alpha)}, \tag{4}$$

donde $\boldsymbol{\omega_0(\alpha)} = \mathbf{exp}\, \boldsymbol{i(\Sigma\, \alpha_a\, A_a^b)}$ es una matriz diagonal unitaria descrita por $\boldsymbol{n-1}$ parámetros reales $\boldsymbol{\alpha_a}$. Cada factor $\boldsymbol{\omega_{ij}(n_{ij})}$ es una rotación compleja en $\boldsymbol{ij}$.

La principal diferencia es que la masa no es invariante bajo las reestructuras de los campos de neutrinos. En consecuencia, no hay libertad para eliminar $\boldsymbol{n-1}$ fases y eso significa que hay fuentes adicionales para violación de CP en las teorías de norma con neutrinos de Majorana.

Para discutir realmente los experimentos de oscilación de neutrinos, se debe tomar en cuenta los efectos sobre la materia. Esto es claro para el caso de los neutrinos solares, pues deben cruzar el interior del Sol, así como la materia terrestre antes de llegar a algún detector subterráneo, como Super-Kamiokande. Al atravesar la materia, estos interactuarán con las partículas en el medio; la presencia de electrones cambiará sus niveles de energía de los eigenestados de masa, por lo que debe ser tomado en cuenta al considerar las oscilaciones de neutrinos que viajan a través de la materia.

Una forma efectiva de la matriz de mezcla leptónica en esquemas generales con neutrinos de Majorana es el mecanismo de subibaja o seesaw [8], donde el isosinglete y el isodoblete como términos de masa coexisten. El modelo más general es descrito por $(\boldsymbol{n},\boldsymbol{m})$, siendo $\boldsymbol{n}$ el número de isodobletes bajo $\boldsymbol{SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y}$ y $\boldsymbol{m}$ el número de iso-singletes leptónicos. Estos singletes leptónicos de dos componentes contienen, en general, un término de masa de Majorana invariante de norma, de Lorentz, que rompe con la simetría del número leptónico. Como resultado, la matriz de mezcla resulta una matriz rectangular $\boldsymbol{K}$ que no es unitaria. En un esquema con $\boldsymbol{m} < \boldsymbol{n}, \boldsymbol{n} - \boldsymbol{m}$ neutrinos permanecerán sin masa, mientras que $\boldsymbol{2m}$ adquirirán masas de Majorana, la mitad ligeros y la mitad pesados. En el caso que $\boldsymbol{m} > \boldsymbol{n}$ y $\boldsymbol{m} = \boldsymbol{2n}$, corresponde al modelo inverso del seesaw.

Así, el modelo bajo el grupo $\boldsymbol{SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y}$ no parece ser la teoría completa de las partículas por varias razones [9]. En primera instancia, razones teóricas: esta contiene muchos parámetros libres que siguen sin ser explicados, como el espectro de masa y de sabor de los quarks; la violación de paridad y la cuantización de carga que fueron introducidas para este fin. Por otra parte, están las explicaciones experimentales que apuntan hacia una extensión del SM (BSM, por sus siglas en inglés): el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos, la evidencia de materia oscura en el Cosmos, la asimetría bariónica observada en el Universo, la evidencia de la inflación cósmica, así como la energía oscura. El tópico de interés en este trabajo de investigación es la Materia Oscura (DM, por sus siglas en inglés).

Un caso abierto en la Cosmología es, precisamente, el entendimiento de la asimetría de materia y antimateria. Un modelo atractivo para darle solución consiste en generar una asimetría de leptón-anti-leptón fuera del equilibrio de los decaimientos de las partículas mensajeras que violan CP y que son encargadas de dar masa a los neutrinos [10]. Esto solo podría ocurrir en un universo muy temprano, convirtiendo la asimetría del número leptónico en una asimetría bariónica. En una imagen como esta, los neutrinos serían responsables del origen de la materia [11].

Agregado a esto, a través del último siglo, los neutrinos han sido una gran herramienta para el entendimiento de interacciones débiles y la formulación del SM en la física de partículas. Entre los retos que se presentan hoy en día para la Física de Partículas, varios tienen que ver con este sector: la naturaleza de los neutrinos, en cuanto a la violación del número leptónico; el origen de su masa, comparados con el resto de los fermiones en el SM, son demasiado ligeros; su patrón de mezcla; violación de CP, así como de sabor en un leptón cargado; así como sus propiedades en los aceleradores de altas energías [12].

Así, lo descrito anteriormente sugiere que el SM es una teoría efectiva para bajas energías, la cual se rompe en cierto punto. Este es el reto que queda abierto, la física que se encuentra más allá de esta escala (escala electrodébil, $\boldsymbol{m_{Z^0} \sim 100\ \mathrm{GeV}}$) y que, en principio, tiene dos caminos distintos: $(\boldsymbol{i})$ continuar en la dirección de búsqueda por un nivel mucho más fundamental que el del SM, lo cual la complementaría; $(\boldsymbol{ii})$ la posibilidad de extender las simetrías básicas de los campos y sus interacciones, como lo describe la Teoría de Gran Unificación (GUT, por sus siglas en inglés) [13].

EL SEESAW INVERTIDO

En el mecanismo subibaja o *seesaw* invertido, usado para la generación de masas de los neutrinos en el modelo $\nu\mathrm{SSM}$, se puede suponer que la escala de energía es baja, siempre que se elijan acoplamientos Yukawa correspondientemente pequeños para dar cuenta de las pequeñas masas de los neutrinos. De hecho, de acuerdo con la ecuación

$$m_\nu^I = -M_D M_2^{-1} M_D^T, \tag{5}$$

se pueden acomodar masas de neutrinos aceptablemente pequeñas, tomando estos Yukawas del orden de Y^e. Sin embargo, hacerlo elimina un rico potencial fenomenológico asociado con la matriz Dirac-Yukawa: como los efectos de evolución del grupo de renormalización, la violación del sabor leptónico y las interacciones no estándar. Además, esto es algo poco estético ya que una motivación

importante del mecanismo *seesaw* es evitar los pequeños acoplamientos Yukawa. Aunque perfectamente consistente, aquí no es a lo que se refiere con *seesaw* a baja escala.

Ahora, el primer ejemplo de lo que se quiere decir con esto. Para comprender la construcción más simple de este mecanismo, se señalando que el número de fermiones en una teoría de norma es completamente arbitrario, ya que esta es libre de anomalías. Hasta ahora, se han considerado esquemas de *seesaw* con $(n,m) = (3,3)$, pues cuando el subibaja se realiza con un contenido de leptones no mínimo, surgen nuevas características. Una alternativa al modelo más simple $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ *seesaw* tipo I extiende el contenido leptónico de $(3,3)$ a $(3,6)$, agregando al SM, tres pares de dobletes (ν_i^c, S_i) con singletes de $SU(2)$ donde $(i = 1,2,3)$. Estos S_i poseen el mismo número leptónico global $U(1)_L$ que el i-ésimo neutrino, es decir, $L = +1$; pero opuesto al correspondiente a ν_i^c, es decir, $L = -1$.

Después del rompimiento de simetría espontáneo (SSB, por sus siglas en inglés) se obtiene la matriz de masa siguiente en la base $\{\nu_L, \nu_L^c, S_L\}$:

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & Y_\nu^T\langle\Phi\rangle & 0 \\ Y_\nu^T\langle\Phi\rangle & 0 & M^T \\ 0 & M & \mu \end{pmatrix}, \tag{6}$$

donde Y_ν es una matriz arbitraria compleja de orden 3×3 y M, μ son matrices de masa complejas singletes de norma (μ es simétrica). Tenga en cuenta que la entrada M se puede agregar a mano, ya que es tanto singlete de norma como neutral bajo la simetría de número leptónico. Sin embargo, este último se rompe explícitamente por los términos de masa $\mu_{ij}S_iS_j$ distintos de cero y se recupera haciendo que los neutrinos ligeros sean estrictamente no masivos ($m_\nu \to 0$ cuando $\mu \to 0$).

Por lo tanto, la pequeñez de la masa de neutrinos asociada con un pequeño parámetro μ es natural, en el sentido de t'Hooft. Además, en modelos específicos, esta pequeñez puede generarse dinámicamente o surgir de la violación espontánea del número leptónico (SLNV, por sus siglas en inglés), en cuyo caso uno tiene un Majoron. En contraste con este último caso de *seesaw*, la escala asociada con SLNV es relativamente baja, posiblemente por debajo de la escala $O(TeV)$. La generación en masa se ilustra mediante el diagrama de Feynman en la Figura 1. La matriz de masa efectiva de neutrinos ligeros obtenida después del seesaw invertido tipo I es

$$m_\nu^{invertido} = M_D^T M^{T\,-1}\mu M^{-1}M_D^*. \tag{7}$$

Así, la pequeñez de la masa del neutrino se tiene de forma natural, en el sentido de t'Hooft, protegida por la simetría $U(1)_L$.

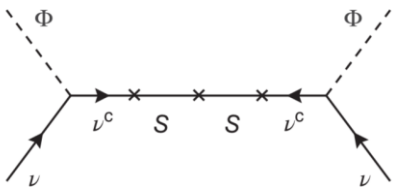


Figura 22 *Ilustración del modelo seesaw inverso.*

MATERIA OSCURA

Hasta ahora, la gran explosión *(Big Bang)* [14] es el modelo con mayor aceptación en la Cosmología, pues narra la historia del Universo desde el espacio-tiempo, donde la densidad de materia-energía era muy grande. Esta es una descripción de la geometría y evolución del universo, así como el origen de las estructuras que lo conforman, y por ello se denomina el Modelo Estándar Cosmológico. De todo lo originado por el Big Bang. Actualmente, el 4.5% del universo está conformado por átomos (responsables del gas, polvo intergaláctico e interestelar, estrellas, planetas y de la vida); el 23% por DM, que a diferencia de los átomos, no emite ni absorbe luz y se detecta únicamente a través de las interacciones gravitacionales que tiene con otras estructuras; y el 72.5% restante por energía oscura, la cual es la responsable de la aceleración de la expansión del Universo [15].

La Cosmología estudia cada una de las características del universo, cuyo objetivo principal es establecer el estado térmico, químico y estructural del Cosmos en su estado actual, en términos de lo que alguna vez fue el universo temprano. Este sistema se considera suficientemente complejo debido a todos los objetos que lo conforman, estos van desde el polvo de granos carbónicos hasta los quásares. Sin embargo, los científicos en esta rama describen al universo con las siguientes características [16]:

- $\boldsymbol{\rho \sim 10^{-26}}$ kg/m³ de densidad, junto con una producción de luz de $\boldsymbol{J \sim 10^{-39}\ \mathrm{W/m^3}}$.
- Una estructura química muy particular, donde la mayoría de las partículas la conforman fotones fríos o neutrinos, y donde un gran porcentaje de la energía está dada por materia bariónica ordinaria, la materia oscura fría, y una energía del vacío efectiva (constante cosmológica) (ver Tabla 1).
- Un estado térmico inestable caracterizado por tener temperaturas distintas tanto para fotones como para neutrinos, así como una falta de núcleos pesados ligados fuertemente.
- Una composición jerárquica de estructuras ligadas gravitacionalmente: planetas, estrellas, agujeros negros, galaxias y cúmulos de galaxias.
- Un universo que se expande continuamente, refiriéndose al incremento de las distancias entre galaxias respecto al tiempo.

Esta última afirmación implica que el Universo poseía mayor densidad en un estado temprano. Existen múltiples evidencias, empíricas y teóricas, de una expansión que ha ocurrido al menos desde una época en que la densidad del Cosmos era 40 órdenes de magnitud mayor a la actual. Esto quiere decir que poseía una temperatura de $\boldsymbol{k_B\, T > 10\ \mathrm{MeV}}$, donde $\boldsymbol{k_B}$ es la constante de Boltzmann ($\boldsymbol{k_B} = 1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K); en otras palabras, en un estado temprano del universo se podría observar cómo estrellas y galaxias se fundían en un plasma uniforme de partículas elementales.

Tabla 14 *Ocupantes conocidos y sospechados del Cosmos [17].*

Especies ($\boldsymbol{i}$)	$\boldsymbol{n_i(cm^{-3})}$	$\boldsymbol{\Omega_i = \rho_i/\rho_c}$
Fotones de CBR	$\boldsymbol{n_\gamma = 410.7}$	$\boldsymbol{\Omega_\gamma = 2.473 \times 10^{-5}\, h^{-2}}$
$\boldsymbol{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau}$	$\boldsymbol{n_\nu = (3/11) n_\gamma}$	$\boldsymbol{\Omega_\nu < 0.0025\, h^{-2}}$
Bariones	$\boldsymbol{n_b \approx 2.482 \times 10^{-7}}$	$\boldsymbol{\Omega_b = 0.02207\, h^{-2}}$
Materia oscura fría	?	$\boldsymbol{\Omega_{cdm} = 0.1198\, h^{-2}}$
Vacío	0	$\boldsymbol{\Omega_\Lambda = 0.685^{+0.017}_{-0.016}}$
Total	–	$\boldsymbol{\Omega = 1.0007}$

En la Tabla 1, $\boldsymbol{\Omega}$ (adimensional) representa la densidad total de materia-energía del universo, mientras que $\boldsymbol{\Omega_Y}$ se refiere a la contribución parcial de cada componente $\boldsymbol{Y}$. Se utilizan subíndices en

mayúsculas para valores de densidad en un tiempo $\boldsymbol{t}$ determinado y minúsculas para los valores actuales. Por ejemplo, $\boldsymbol{\Omega_m = \Omega M(t_0) = 0.315^{+0.016}_{-0.017}}$ [17] es la densidad total de materia en el universo actual.

Históricamente, el astrónomo E. Öpik (1922) observó que debería existir mayor masa de la detectable visualmente en la galaxia de Andrómeda (M31). Dicha masa no visible interactuaba gravitacionalmente con su entorno, sin colisionar, absorber ni emitir luz [18]. Más tarde, J. Oort (1932) encontró el mismo resultado en las cercanías al Sistema Solar: al menos el doble de la masa visible [19]. F Zwicky (1933), estudiando el cúmulo de la Constelación de Coma Berenices, encontró que debería haber al menos 1000 veces la masa observable [20]. Fue hasta 1980 cuando V. C. Rubin, W. K. Ford Jr. y N. Thonnard argumentaron ante la comunidad científica la posibilidad de materia más allá del rango visible [21]. Actualmente, con mediciones modernas, se siguen obteniendo resultados con más masa de la visible, por ejemplo, en el Cúmulo de Coma y en el Grupo Local de Galaxias (GLG). Dado que la región visible tiene $\boldsymbol{\Omega = 0.002}$, el 98% de la materia restante pertenece al sector oscuro [22].

La nucleosíntesis del Big Bang primordial [23] describe la creación de los primeros núcleos atómicos. Solo puede reproducirse para densidades de bariones alrededor de $\boldsymbol{\Omega_b = 0.0499}$ [17], lo que implica que la materia no observable sólo puede ser de naturaleza no bariónica. La radiación de fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés) es el calor remanente del Big Bang. Cuando el Universo alcanzó temperatura suficientemente baja, los átomos neutros se formaron (recombinación) y los fotones se desacoplaron $\sim \boldsymbol{400\,000}$ años después de la gran explosión. El satélite COBE midió su temperatura en $\boldsymbol{2.725 \pm 0.001\,K}$. Los datos de WMAP, MAXIMA, BOOMERanG y Planck [24] establecen que: ($\boldsymbol{i}$) el universo posee una geometría plana ($\boldsymbol{\Omega \simeq 1}$), ($\boldsymbol{ii}$) se tiene un contenido de bariones $\approx \boldsymbol{4.6}\%$ ($\boldsymbol{\Omega_b = 0.0224 \pm 0.00093}$), ($\boldsymbol{iii}$) el contenido de DM $\approx \boldsymbol{24}\%$ ($\boldsymbol{\Omega_{cdm} = 0.2402}$), y ($\boldsymbol{iv}$) el contenido de energía oscura $\approx \boldsymbol{71.4}\%$ ($\boldsymbol{\Omega_\Lambda = 0.7135}$). En cuanto a estructuras de gran escala, el 2dFGRS y el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) —con datos de más de un millón de galaxias— han permitido conocer la distribución estructural cósmica y detectar las *oscilaciones acústicas de bariones* a $\boldsymbol{z \approx 0.35}$. Las pequeñas fluctuaciones del CMB no habrían tenido tiempo de crecer hasta las estructuras actuales sin la presencia de pozos de potencial adicionales debidos a materia no bariónica no relativista, dando lugar a la materia oscura fría (CDM, por sus siglas en inglés). La simulación *Millennium Run* (2005) reproduce exitosamente la distribución estructural con una componente sustancial de materia oscura fría (modelo ΛCDM) [25].

Por lo dicho anteriormente, la materia visible no puede ser la única existente. Las curvas de rotación, la teoría de la inflación, la nucleosíntesis primordial, el CMB y las estructuras a gran escala señalan la existencia de materia oscura fría (CDM) y caliente (HDM, por sus siglas en inglés) [26].

Se tiene la clasificación de la DM en bariónica y no bariónica. En cuanto a la DM bariónica, su densidad es $\boldsymbol{\Omega_b = 0.0224}$, que es un orden mayor a la correspondiente a los bariones visibles, concordando con la nucleosíntesis primordial. Se cree que los bariones oscuros faltantes se encuentran en gas ionizado dentro de galaxias, galaxias de brillo superficial bajo (LSB), nubes de hidrógeno frías, o en objetos compactos denominados MACHOs (MAssive Compact Halo Objects) como enanas, estrellas de neutrones, planetas y hoyos negros [27]. Estudios de microlente gravitatoria (EROS, MACHO, OGLE, DUO) comprobaron la existencia de MACHOs, pero la LMC concluye que estos sólo proporcionarían aproximadamente el 50% del halo oscuro [28], descartándolos como ingredientes primordiales de la materia oscura. Por otro lado, la materia oscura no bariónica, que es la de interés en este trabajo, en concordancia con la medida de Plank, restringe su densidad a $\boldsymbol{\Omega_{nb} \simeq 0.28}$ [24]. Los candidatos deben ser estables en escalas cosmológicas, neutros eléctricamente y deben reproducir la densidad residual observada. Finalmente, la materia oscura inerte, la cual surge de BSM. Propuesto inicialmente en teorías de ruptura de la simetría electrodébil [29] y posteriormente como candidato a materia oscura [30]. Particularmente, en el modelo de dos dobletes inerte (IDM), una extensión mínima del SM con un doblete extra de campos escalares complejos que se acoplan al sector escalar y bosónico de norma, pero no directamente a los fermiones. Una simetría discreta $\boldsymbol{Z_2}$ hace que las nuevas partículas aparezcan sólo en pares en los vértices de interacción [Goudelis]. Propuesto inicialmente en teorías de ruptura de la simetría

electrodébil [29] y posteriormente como candidato a materia oscura [30], los escalares neutros del nuevo doblete se comportan como WIMPs.

Se identifican tres regiones de masa en el espacio de parámetros donde el escalar inerte brinda la densidad residual de materia oscura necesaria: masa baja ($< \mathbf{10}$ GeV, quasi-excluida por XENON100), masa intermedia (10–150 GeV) y masa grande ($> \mathbf{500}$ GeV) [31].

Finalmente, la DM se clasifican por la temperatura en la formación galáctica [32]: ($\boldsymbol{i}$) materia oscura caliente (HDM), partículas relativistas en la formación galáctica, como los neutrinos. Un neutrino ligero del orden de keV es el ejemplo más aceptado en el SM. Sin embargo, $\boldsymbol{\Omega\nu\, h^2 < 0.0025}$ [17], lo que los hace poco relevantes para la densidad total; ($\boldsymbol{ii}$) Materia oscura fría (CDM), partículas no relativistas, que por su mínima presión y el efecto de la gravedad colapsaron eficientemente (ejemplos, axiones, neutralinos, wimpzillas, solitones); y ($\boldsymbol{iii}$) materia oscura tibia (WDM), partículas semi-relativistas en la formación galáctica, como los gravitinos estériles con masas ~ keV o neutrinos de SUSY.

Nosotros estamos interesados en materia oscura inerte, específicamente del tipo materia débilmente interactuante (WIMPs, por sus siglas en inglés). Estas son partículas pesadas que se originan mediante interacciones electrodébiles en extensiones del SM [33]. En el Universo temprano, cuando $\boldsymbol{T \gtrsim m\chi}$, se formaban en equilibrio térmico con el resto de partículas. La densidad residual de un WIMP térmico es $\boldsymbol{\Omega h^2 \approx (3 \times 10^{-27} cm^3/s)/\langle \sigma_{ann}\, v \rangle}$. Para detectar WIMPs se emplean métodos directos (retroceso nuclear por dispersión elástica: CDMS, XENON, CRESST, DAMA, CoGeNT) [34] e indirectos (detección de productos de aniquilación en halos galácticos o interior del Sol/Tierra: fotones de alta energía, rayos gamma, neutrinos masivos, pares $\boldsymbol{e^+e^-}$ o $\boldsymbol{p\,\bar{p}}$) [35].

PARTE EXPERIMENTAL

EL MODELO

Para construir el modelo considerando el mecanismo *seesaw* inverso, se propone una extensión del SM. Este incluye campos fermiónicos adicionales, entre ellos los neutrinos derechos *N* y un campo fermiónico *χ*, el cual sería el candidato a materia oscura. Además, un campo escalar *σ*, el cual proveerá masa de Dirac a los nuevos fermiones. Así, además de las partículas del SM se agregan las siguientes: ($\boldsymbol{i}$) $\boldsymbol{N}$, neutrino diestro (RH neutrino), ($\boldsymbol{ii}$) $\boldsymbol{\chi}$, singlete fermiónico, y ($\boldsymbol{iii}$) $\boldsymbol{\sigma}$, singlete escalar.

En la Tabla 2 se da el número leptónico de cada uno de estos campos.

Tabla 2. Número leptónico de los campos adicionales del modelo.

	$\boldsymbol{\nu}$	$\boldsymbol{N}$	$\boldsymbol{\chi}$	$\boldsymbol{\sigma}$
$\boldsymbol{U(1)_L}$	**1**	**1**	**0**	**−1**
$\boldsymbol{SU(2)}$	**1**	**1**	**1**	**−1**

El lagrangiano que contiene la masa del neutrino, tanto el término de Dirac como de Majorana, se expresa como sigue:

$$-\mathcal{L} = Y_\nu \bar{L}\tilde{\varphi} N + Y_\chi \sigma \bar{N}\chi + (M/2)\,\bar{N}^c N + (m/2)\bar{\chi}^c \chi + \mathbf{h.c.} \qquad (8)$$

Este lagrangiano tiene dos fuentes para la violación del número leptónico: $\boldsymbol{(M/2)\bar{N}^c N}$ y $\boldsymbol{Y_\chi \sigma \bar{N}\chi}$. El primer término es de suave rompimiento, de tal forma que *M* será elegido pequeño, mientras que el segundo es un término de rompimiento dinámico a través del valor de expectación en el vacío asociado al campo $\boldsymbol{\sigma}$, $\boldsymbol{u}$.

La matriz de masas de neutrinos en la base $\{\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{N}, \boldsymbol{\chi}\}$ es

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & Y_\nu\, v/\sqrt{2} & \mathbf{0} \\ Y_\nu\, v/\sqrt{2} & M & Y\chi\, u/\sqrt{2} \\ \mathbf{0} & Y_\chi\, u/\sqrt{2} & m \end{pmatrix}. \tag{9}$$

En esta se encuentran los parámetros de masa $\boldsymbol{M}$ de los neutrinos derechos, así como del candidato a materia oscura, $\boldsymbol{m}$. Las constantes de acoplamiento de Yukawa $\boldsymbol{Y_\nu}$y $\boldsymbol{Y_\chi}$, multiplicadas por los valores de expectación $\boldsymbol{v = 246\ \mathrm{GeV}}$, del SM, y $\boldsymbol{u}$ del modelo propuesto. Diagonalizando la matriz de masa $\boldsymbol{\mathcal{M}}$, se obtienen las masas de los neutrinos:

$$m^1 = \left(\frac{1}{6}\right)\left[-2^{\frac{2}{3}}\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{\frac{1}{3}} - \frac{\left(2^{\frac{4}{3}}A\right)}{\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{1/3}} + 2C\right], \tag{10}$$

$$m^2 = \left(\frac{1}{6}\right)\left[-(-2)^{\frac{2}{3}}\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{\left((-2)^{\frac{4}{3}}A\right)}{\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{1/3}} + 2C\right], \tag{11}$$

$$m^3 = \left(\frac{1}{6}\right)\left[(-2)^{\frac{2}{3}}\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{\left(2^{\frac{4}{3}}A\right)}{\left(\sqrt{(B^2 - 4A^3)} - B\right)^{1/3}} + 2C\right], \tag{12}$$

donde

$$A = M^2 - Mm + m^2 + 3\left[\left(\frac{Y_\chi u}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{Y_\nu v}{\sqrt{2}}\right)^2\right], \tag{13}$$

$$B = 9\left(\frac{Y_\chi u}{\sqrt{2}}\right)^2 (M + m) + (M - 2m)\left[2M^2 + Mm - m^2 + 9\left(\frac{Y_\nu v}{\sqrt{2}}\right)^2\right], \tag{14}$$

$$C = M + m. \tag{15}$$

Los resultados numéricos obtenidos son presentados a continuación.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Se realizó un escaneo numérico en la siguiente región de parámetros:

$$\begin{aligned} v &= 246\ \mathrm{GeV}, & u &= [1\ \mathrm{GeV}, 1\ \mathrm{TeV}], \\ Y_\nu &= [10^{-10}, 0.1], & Y_\chi &= [10^{-10}, 0.1], \\ M &= [1\ \mathrm{eV}, 1\ \mathrm{TeV}], & m &= [1\ \mathrm{eV}, 1\ \mathrm{TeV}]. \end{aligned}$$

Con ello se obtienen las siguientes gráficas (Figuras 1, 2 y 3), donde se comparan las masas tanto del candidato a materia oscura $\boldsymbol{\chi}$, como de los otros dos neutrinos, $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$, involucrados en esta interacción.

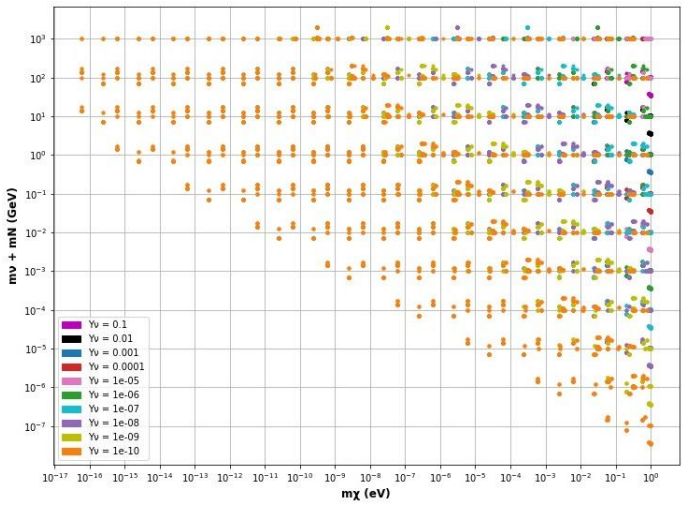


Figura 23 *Comparación de la masa del candidato a materia oscura* $\boldsymbol{m_\chi}$ *con la suma de las masas de los otros dos neutrinos,* $\boldsymbol{m_\nu}$ *y* $\boldsymbol{m_N}$*, involucrados en la interacción. Con colores se distingue el escaneo según el valor de la constante de Yukawa* $\boldsymbol{Y_\nu}$*.*

Como se observa en la Figura 2, se separó el neutrino con menor masa para considerarlo como la masa del candidato a materia oscura $\boldsymbol{\chi}$, y se compara con la suma de las masas de los otros dos neutrinos $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$. Se aprecia que, mientras que se obtiene un candidato a DM $\boldsymbol{\chi}$ con menor al $\boldsymbol{m_\chi < O(1)\ \mathrm{eV}}$, la suma de los otros neutrinos rebasa los 50 eV e incluso los GeV. Se muestra también que hay mayores posibilidades de obtener neutrinos en estos rangos cuando $\boldsymbol{Y_\nu \rightarrow 0}$.

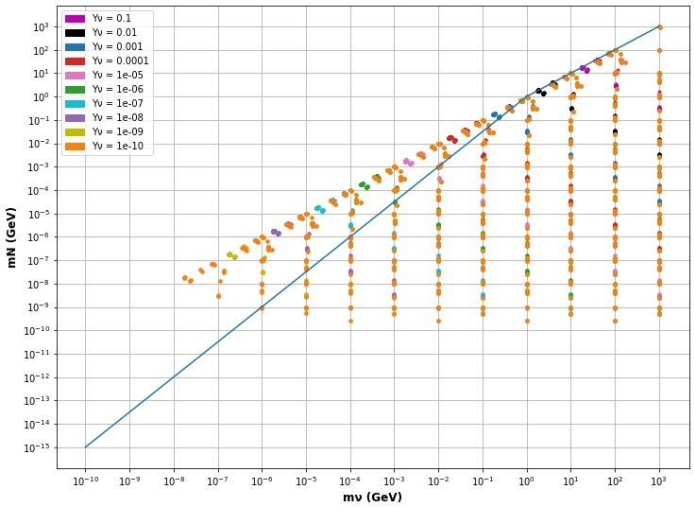


Figura 24 *Gráfica de* $\boldsymbol{m_\nu}$ *vs* $\boldsymbol{m_N}$*, comparación de masas de los neutrinos* $\boldsymbol{\nu}$ *y* $\boldsymbol{N}$*.*

En la Figura 3, después de haber reconocido el candidato a DM, se hace la comparación de masas de los otros dos neutrinos, $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$.

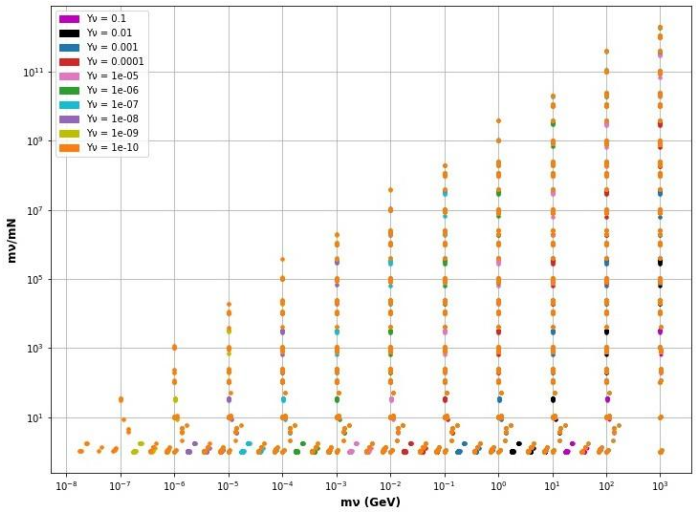


Figura 4 Gráfica de $\boldsymbol{m_\nu}$ vs $\boldsymbol{m_\nu/m_N}$, *Distinción de órdenes de magnitud de las masas de los neutrinos* $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$.

Finalmente, para la Figura 4 se vuelve a hacer la comparación de masa de los neutrinos *v* y *N*; esta vez haciendo la distinción de la diferencia de órdenes entre ellos. De manera que la línea que se forma en la parte inferior de la gráfica es aquella donde ambos neutrinos tienen el mismo orden de masa.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso el estudio de un candidato a materia oscura en el marco de un modelo extendido en los sectores fermiónico y de Higgs como una extensión del Modelo Estándar. En este se incluyó un neutrino $\boldsymbol{N}$ y un campo fermiónico singlete $\boldsymbol{\chi}$, el cual se propuso como candidato a materia oscura, más un campo singlete escalar σ que viola la conservación del número leptónico ($\boldsymbol{\nu}$SSM). Se identificó dicha partícula fermiónica neutra con una masa del orden de eV. Para ello, se consideró el mecanismo de subibaja (seesaw) inverso, donde la masa de los neutrinos adicionales $\boldsymbol{\nu}$ y $\boldsymbol{N}$, se hizo dinámica por el escalar singlete $\boldsymbol{\sigma}$. Ya que la escala natural para el valor de expectación de vacío escalar estaba cerca de la escala débil, nos enfocamos en la posibilidad de que el escalar singlete se conectara con la materia oscura, es decir, el escalar también fuera el mediador entre el sector oscuro y el Modelo Estándar. Se construyó el lagrangiano del modelo, así como la matriz de masa y se calcularon las masas de los neutrinos. Con ello identificamos la masa de la partícula más ligera para identificarla como materia oscura ligera con masas menores que $\boldsymbol{O(1)\ \mathbf{GeV}}$. Realizamos un análisis numérico sobre el espacio de parámetros sujeto a las restricciones de detección indirecta y directa. Comparando los resultados con los datos teóricos y experimentales reportados a la fecha, se obtuvo que, en el marco del Modelo Estándar, difícilmente la suma de las masas de las tres partículas fermiónicas establecidas cumple con lo conocido para los neutrinos, por lo que concuerda con la búsqueda de una extensión de este.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Lesgourgues, G. Mangano, G. Miele and S. Pastor, *Neutrino Cosmology*, Cambridge University Press, 978-1-107-01395-7, Frontmatter.
2. H. Murayama, *Physics beyond the Standard Model and Dark Matter*, [arXiv:hep-ph/0704.2276v1] (2007).
3. Zwicky F., *Helvetica Physica Acta*, Acta 6, 110 (1933).
4. P. Langacker, The Standard Model and Beyond, 1st ed., CRC Press, Boca Raton (2010).
5. S. Navas *et al.* (Particle Data Group), *Review of Particle Physics*, Phys. Rev. D 110, 030001 (2024), doi:10.1103/PhysRevD.110.030001.

6. E. Majorana, *Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*, Nuovo Cim. 14, 171 (1937), doi:10.1007/BF02961314.
7. R. N. Mohapatra and G. Senjanović, *Neutrino Mass and Spontaneous Parity Nonconservation*, Phys. Rev. Lett. 44, 912 (1980).
8. M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky, Complex Spinors and Unified Theories, Conf. Proc. C 790927, 315 (1979).
9. P. Langacker, The Standard Model and Beyond, CRC Press, Boca Raton (2010).
10. A. D. Sakharov, *Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe*, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967) [JETP Lett. 5, 24 (1967)].
11. M. Fukugita and T. Yanagida, *Baryogenesis Without Grand Unification*, Phys. Lett. B 174, 45 (1986).
12. K. Abe *et al.* (T2K Collaboration), *Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam*, Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011).
13. M. Gell-Mann, P. Ramond, and R. Slansky, *Complex Spinors and Unified Theories*, Conf. Proc. C 790927, 315 (1979).
14. P. J. E. Peebles, Principles of Physical Cosmology, Princeton University Press, Princeton (1993).
15. V. Aviles-Garcia and A.Ruelas-Mayorga, *El Universo oculto*, Rev. Divulg. Cienc. UNAM, núm. 122 (2009).
16. J. Rich, *Fundamentals of Cosmology*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg (2001).
17. S. Navas *et al.* (Particle Data Group), *Astrophysical Constants and Parameters*, Review of Particle Physics, Phys. Rev. D 110, 030001 (2024), Sec. 2.
18. E. Öpik, *An Estimate of the Distance of the Andromeda Nebula*, Astrophys. J. 55, 406 (1922) [Erratum: Astrophys. J. 57, 192 (1923)], doi:10.1086/142680.
19. J. H. Oort, *The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related Problems*, Bull. Astron. Inst. Netherlands 6, 249 (1932).
20. F. Zwicky, *Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln*, Helv. Phys. Acta 6, 110 (1933), doi:10.5169/seals-110267.
21. V. C. Rubin, W. K. Ford Jr., and N. Thonnard, *Rotational Properties of 21 Sc Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii, from NGC 4605 (R = 4 kpc) to UGC 2885 (R = 122 kpc)*, Astrophys. J. 238, 471 (1980).
22. M. Fukugita, C. J. Hogan, and P. J. E. Peebles, The Cosmic Baryon Budget, Astrophys. J. 503, 518 (1998).
23. R. A. Alpher, H. Bethe y G. Gamow, *Physical Review*, 73, 803 (1948).
24. N. Aghanim *et al.* (Planck Collaboration), *Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters*, Astron. Astrophys. 641, A6 (2020).
25. G. Efstathiou, W. J. Sutherland, and S. J. Maddox, *The Cosmological Constant and Cold Dark Matter*, Nature 348, 705 (1990).
26. H. V. Klapdor-Kleingrothaus y K. Zuber, *Particle Astrophysics* (1997).
27. B. Carr, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 32, 531 (1994).
28. C. Alcock *et al.* (MACHO collaboration), *Physical Review Letters*, 74, 2867 (1995). E. I. Gates, G. Gynk y M. S. Turner, *Physical Review Letters*, 74, 3724 (1995).
29. N. G. Deshpande and E. Ma, *Physical Review D*18 (1978), 2574.
30. R. Barbieri, L. J. Hall, and V. S. Rychkov, *Physical Review D*74 (2006), 015007.
31. M. Gustafsson, *The Inert Doublet Model and Its Phenomenology*, PoS CHARGED2010 (2010), 030; A. Goudelis, B. Herrmann and O. Stral, *Dark matter in the Inert Doublet Model after the discovery of a Higgs-like boson at the LHC*, JHEP 09 (2013), 106.
32. P. Gondolo, *Non-baryonic dark matter*, NATO Sci. Ser. II 187 (2005), 279-333.
33. K. Sigurdson, M. Doran, A. Kurylov, R. R. Caldwell and M. Kamionkowski, *Physical Review D*70, 083501 (2004).
34. J. Billard *et al.*, *Direct detection of dark matter -- APPEC committee report*, Rep. Prog. Phys. 85, 056201 (2022).
35. J. M. Gaskins, *A review of indirect searches for particle dark matter*, Contemp. Phys. 57, 496 (2016).

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 821693

ISBN TOMO IV
FÍSICO MATEMÁTICAS Y CIENCIAS DE LA TIERRA

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.