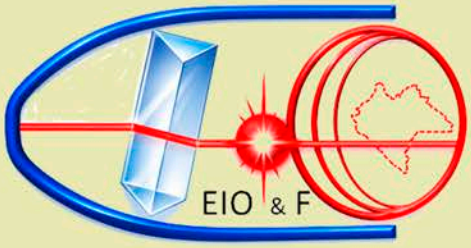


REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

"Semillero de Investigadores"

ISSN: 2007-9400



Quinto Encuentro Internacional de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica

Ejemplar de divulgación

"Tecnología para la sociedad"

Índice LatIndex: Folio 23658

www.revistatecnologiadigital.com

Volumen 16 Número 2

Desde 2011

Año 2026

REVISTA TECNOLOGÍA DIGITAL

CONSEJO EDITORIAL

Editor Principal. Dr. Jorge Luis Camas Anzueto
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
jcamas@tuxtla.tecnm.mx

Editores Invitados:
Dr. Rubén Grajales Coutiño
ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx

Dr. Pedro Marcos Velasco Bolom
D09270506@tuxtla.tecnm.mx

Tecnológico Nacional de México/I.T. de Tuxtla Gutiérrez

Autoridades

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Marisa Guadalupe Flores Aguilar
Directora

María Magdalena Pérez Salgado
Subdirectora Académica

Revista Tecnología Digital.

Índice LatIndex: 23658.
ISSN: 2007-9400.
Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
Carretera Panamericana Km. 1080.
C.P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
Departamento de Sistemas y Computación.
01-961-6150461 Ext. 319
www.revistatecnologiadigital.com

Editor Responsable.

Editorial Tecnología Didáctica®.
Dr. Héctor Guerra Crespo.
Registro del padrón de editores: 970-94054 de fecha 22-junio-2004.
Palenque 139 Col. ISSSTE, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. C.p. 29060, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
www.tecnologiadidactica.com

Número en colaboración.

Este número es una colaboración con el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en el marco de su 54 aniversario en el Quinto Encuentro Internacional de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica (EIO^3-F) celebrado el 19 y 20 de octubre de 2026. La revisión de artículos, edición y verificación de similitud se llevaron a cabo por el comité organizador del Encuentro de Investigación.

Revista Tecnología Digital. Año 16, Volumen 16, Número 2 de 20 de octubre de 2026 es una publicación anual on-line www.revistatecnologiadigital.com editada por Héctor Guerra Crespo oficinas en Palenque 139 Col. ISSSTE Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México C.P. 29060. correo-e hgcrespo@hotmail.com. Editor responsable: Héctor Guerra Crespo. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2014-022811040300-203 otorgado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. ISSN 2007-9400. Responsable de la última actualización de este número Dr. Héctor Guerra Crespo, Presidente del Consejo Editorial, Palenque 139 Colonia ISSSTE Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29060, fecha de la última modificación 20 de octubre de 2026.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor responsable.

Índice.

Página.

Microplásticos en placenta humana: evidencia obtenida mediante espectroscopía FTIR en pacientes del Hospital de la Mujer de Puebla. 1

Clasificación inteligente de lesiones en la piel mediante descriptores y transformadas matemáticas. 11

Sensores de fibra óptica para el sector aeronáutico: fundamentos y aplicaciones en estructuras y motores. 19

Sensores de fibra óptica que aprovechan las limitaciones de las telecomunicaciones para crear herramientas de medición. 37

La importancia del desarrollo de la fotónica en el Tecnológico Nacional de México: perspectivas y oportunidades. 51

Metagenómica de suelos y optomecatrónica: clave para una agricultura sustentable en Chiapas. 67

Uso y aplicación de la luz linealmente polarizada enfocada en la ciencia y vida cotidiana. 73

Tecnología de diseño asistido por computadora para el desarrollo de dispositivos semiconductores con aplicaciones en emisión y detección de luz ultravioleta. 85

Generación de supercontinuo ultra amplio embebido a partir de un láser de fibra aleatorio. 99

Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la generación de energía eléctrica. 109

Aplicaciones de la optomecatrónica en la agricultura de precisión. 117

Óptica y polarimetría para la caracterización de materiales. 123

Espectroscopía FTIR en la síntesis y caracterización de poliuretanos renovables. 139

Microplásticos en placenta humana: evidencia obtenida mediante espectroscopía FTIR en pacientes del Hospital de la Mujer de Puebla.

Microplastics in Human Placenta: Evidence Obtained Through FTIR Spectroscopy in Patients at the Women's Hospital of Puebla.

Lorena Padilla Martínez (1),
Hospital de la Mujer de Puebla. Servicios Públicos de Salud (IMSS Bienestar), Puebla 72490, México, lorepad@hotmail.com.

María Leonora Linares Jurado (2). Hospital de la Mujer de Puebla, Servicios Públicos de Salud (IMSS Bienestar), Puebla 72490, México, marlene_linaresj@yahoo.com.mx.

Paola Guadalupe Gordillo Guerra (3). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Ciudad de México 04960, México, pgordillo@correo.xoc.uam.mx.

Julio César Ramírez San Juan (4). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla 72840, México, jcram@inaoep.mx.

Orlando Zaca Morán (5). Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Tepetitla, Tlaxcala 90700, México, orlandozaca@hotmail.com.

Raúl Jacobo Delgado Macuil (6). Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Tepetitla, Tlaxcala 90700, México, rdelgadomipn.mx.

Juan Castillo Mixcoátl (7). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla 72570, México, juan.castillo@correo.buap.mx.

Juan Pablo Padilla Martínez* (8). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla 72570, México, juan.padilla@correo.buap.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 15, 2026; aceptado en octubre 13, 2026.

Resumen.

Los microplásticos se han convertido en una preocupación creciente para la salud humana debido a su presencia en el ambiente y a la posibilidad de exposición desde etapas muy tempranas de la vida. En este artículo se explica qué son estas partículas, y cómo pueden identificarse mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en muestras biológicas. Como parte de un estudio realizado con muestras de placenta de pacientes atendidas en el Hospital de la Mujer de Puebla, se analizaron cinco muestras y se identificaron distintos tipos de polímeros. En total se registraron 27 identificaciones, equivalentes a un promedio de 5.4 polímeros por paciente. El polietileno (PE), poliestireno (PS), poliuretano (PU) y nylon o poliamida (PA) fueron identificados en las cinco muestras analizadas; el polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET) se detectaron en tres, mientras que el policloruro de vinilo (PVC) se identificó en una. Estos resultados evidencian la presencia simultánea de diferentes polímeros en tejido

placentario; sin embargo, por sí solos no permiten establecer su origen ni demostrar una relación causal con efectos clínicos o resultados perinatales.

Palabras clave: Espectroscopía, FTIR microplásticos, placenta.

Abstract.

Microplastics are a growing concern for human health due to their widespread presence in the environment and the possibility of exposure from the earliest stages of life. This article describes these particles, how they can reach the maternal–fetal interface, and how to identify them in biological samples using Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy. As part of a study of placental samples from patients at the Hospital de la Mujer de Puebla, we analyzed five samples and identified different polymer types. We recorded 27 polymer detections, corresponding to an average of five polymer types per patient. Polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyurethane (PU), and nylon/polyamide (PA) were identified in all five samples, while polypropylene (PP) and polyethylene terephthalate (PET) were detected in three samples and polyvinyl chloride (PVC) in one sample. While these findings demonstrate the simultaneous presence of different polymer types in placental tissue, they do not establish their origin or demonstrate a causal relationship with clinical effects or perinatal outcomes.

Keywords: FTIR spectroscopy, microplastics, placenta.

1. Descripción del problema.

En pocas décadas, los plásticos pasaron de ser materiales novedosos a convertirse en parte inseparable de nuestra vida cotidiana. Los encontramos en envases y botellas, ropa y fibras textiles, utensilios, materiales de construcción, dispositivos médicos y numerosos productos de consumo. Su éxito se debe, entre otras razones, a que son materiales ligeros, resistentes, versátiles y de bajo costo. Sin embargo, muchas de esas mismas propiedades que los hacen útiles también favorecen su permanencia en el ambiente (Ragusa A., 2021). Una vez desechados, los materiales plásticos pueden fragmentarse progresivamente por efecto de la radiación solar, la abrasión, el agua y otros procesos físicos, químicos y biológicos, generando partículas cada vez más pequeñas (figura 1).



Figura 1. Representación esquemática de la fragmentación de un macroplástico a micro o nanoplásticos.

Cuando estas partículas tienen un tamaño inferior a 5 milímetros, se denominan, en general, microplásticos. Algunos se producen originalmente en dimensiones microscópicas para determinados usos comerciales o industriales, mientras

que otros se originan a partir de la fragmentación de objetos plásticos de mayor tamaño (Ragusa A. 2022, Barceló D., 2023). Su pequeño tamaño facilita que se dispersen en distintos compartimentos del ambiente y que lleguen a elementos con los que tenemos contacto diario. Se han reportado microplásticos en alimentos, agua potable y otros productos de consumo, por lo que la ingestión y la inhalación se consideran vías importantes de exposición humana (Barceló D., 2023), como se muestra en la figura 2.

La pregunta entonces dejó de ser únicamente dónde se encuentran los microplásticos en el ambiente y comenzó a centrarse en algo mucho más cercano: **¿pueden estas partículas entrar y permanecer en nuestro organismo?** En los últimos años se han identificado microplásticos en diferentes muestras y tejidos humanos, entre ellos heces, pulmón, colon, sangre, leche materna y placenta (Barceló D., 2023, Zhu L., 2023, Liu S., 2023), como se muestra en la figura 2. Estos hallazgos muestran que existe exposición humana y que, bajo determinadas condiciones, algunas partículas pueden atravesar barreras biológicas y alcanzar diferentes regiones del organismo. El tamaño de las partículas es uno de los factores que pueden influir en su comportamiento biológico y en su capacidad para atravesar determinadas barreras.

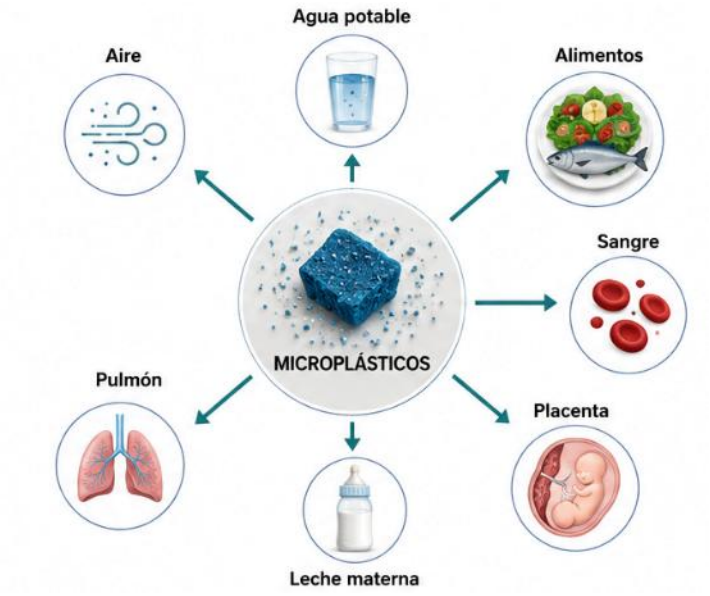


Figura 2. Principales vías de exposición a microplásticos y tejidos o fluidos humanos en los que se han detectado.

Dentro de este panorama, la placenta ocupa un lugar especialmente relevante. Durante el embarazo, este órgano constituye la principal interfaz entre la madre y el feto: participa en el intercambio de oxígeno, nutrientes y productos de desecho y, al mismo tiempo, regula el paso de numerosas sustancias entre ambos organismos (Ragusa A., 2022). Por ello, durante mucho tiempo se podría imaginar a la placenta como una especie de barrera protectora. Sin embargo, no se trata de una barrera completamente impermeable. La posibilidad de detectar partículas de origen plástico en este tejido plantea una pregunta de gran importancia: **¿la exposición humana a los microplásticos puede comenzar incluso antes del nacimiento?**

En 2021, Ragusa y colaboradores reportaron la primera evidencia de microplásticos en la placenta humana: mediante microspectroscopía Raman identificaron 12 fragmentos de entre 5 y 10 µm en cuatro de seis placentas analizadas (Ragusa A. 2021). Estudios posteriores ampliaron estos hallazgos mediante diversas técnicas analíticas. Ragusa y colaboradores profundizaron en su localización en el tejido placentario (Ragusa A., 2022); Zhu y colaboradores identificaron microplásticos en 17 placentas mediante espectroscopía infrarroja directa por láser (Zhu L., 2023); y García y colaboradores detectaron y cuantificaron materiales plásticos en 62 placentas mediante Py-GC-MS (Garcia

M., 2024). En conjunto, estos estudios muestran que la presencia de materiales plásticos en la placenta humana ha sido documentada mediante diversas metodologías analíticas**.**

Sin embargo, detectar microplásticos en la placenta no significa, por sí solo, demostrar que causen una enfermedad. Algunos estudios han propuesto posibles mecanismos relacionados con la inflamación, el estrés oxidativo, las alteraciones celulares y las respuestas inmunológicas; además, estas partículas pueden contener aditivos o transportar otras sustancias presentes en el ambiente (Ragusa A., 2022, Barceló D., 2023). Por ello, el reto científico va más allá de demostrar que existen partículas plásticas en este tejido: es necesario conocer qué polímeros están presentes, cómo llegan hasta la placenta, en qué cantidad y cuáles son sus características, para determinar posteriormente si su presencia puede relacionarse con algún efecto sobre la salud materna o fetal. Los estudios disponibles señalan que aún se requiere ampliar el número de muestras, fortalecer los métodos de identificación y cuantificación, y relacionar los hallazgos experimentales con la información clínica del embarazo y del recién nacido (Zhu L., 2023, Garcia M., 2024).

2. Métodos.

Detectar microplásticos en un tejido biológico como la placenta representa un reto: las partículas buscadas pueden ser microscópicas y estar rodeadas de una gran cantidad de materia orgánica. Por ello, antes de analizarlas, es necesario separarlas del tejido sin alterar de manera significativa los materiales que se desean identificar**.** En este estudio se analizaron muestras de placenta y cordón umbilical obtenidas de pacientes atendidas en el Hospital de la Mujer de Puebla, previa firma del consentimiento informado y de acuerdo con los protocolos éticos establecidos para el proyecto. En la figura 3 se muestra el procedimiento de los pasos a seguir en la identificación de microplásticos.

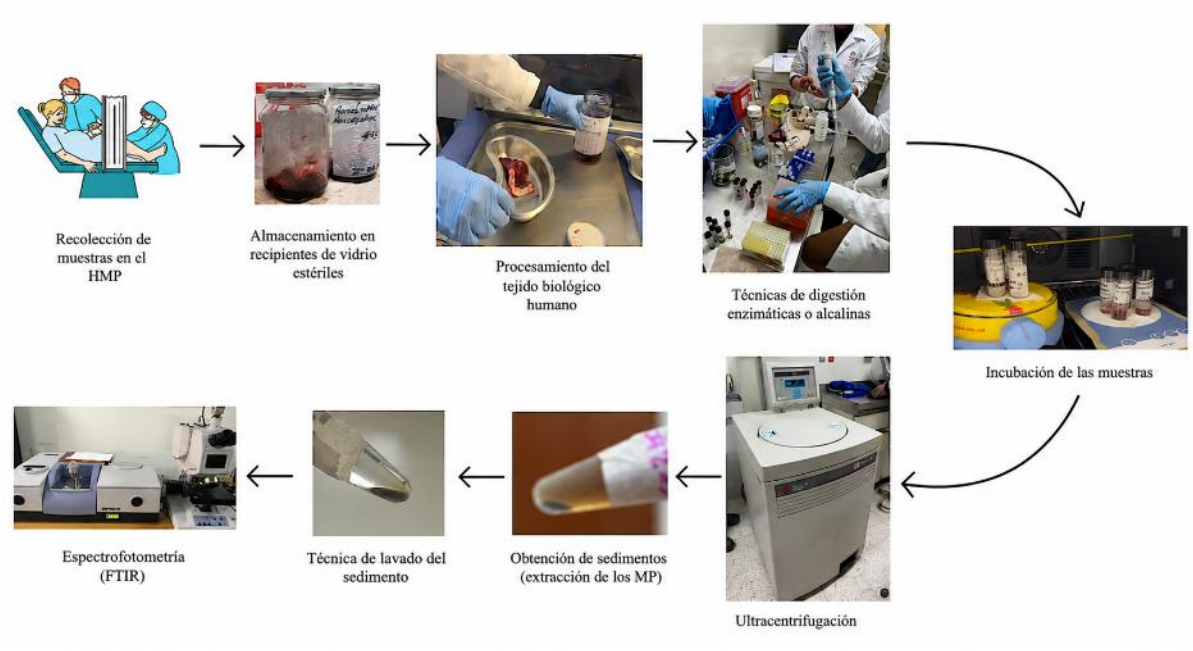


Figura 3. Esquema del procedimiento de preparación y caracterización de las muestras biológicas para la identificación de microplásticos

Una vez recolectadas, las muestras se almacenaron en recipientes de vidrio estériles y el tejido se sometió a un proceso de digestión química, cuyo objetivo fue eliminar la mayor cantidad posible de materia orgánica y facilitar la recuperación de las partículas presentes en la muestra. Posteriormente, se realizaron etapas de incubación, ultracentrifugación y lavados sucesivos hasta obtener un sedimento que concentraba las partículas potencialmente compatibles con microplásticos (Figura 3). Durante este tipo de análisis, es especialmente importante reducir las

posibles fuentes de contaminación externa, ya que fibras o pequeños fragmentos presentes en el ambiente del laboratorio podrían incorporarse accidentalmente a las muestras y confundirse con partículas procedentes del tejido. Por esta razón, durante el procesamiento se implementaron medidas de control para minimizar la contaminación procedente del ambiente y de los materiales utilizados.

La siguiente pregunta fue: ¿cómo saber si las partículas recuperadas eran realmente materiales plásticos y de qué tipo? Para ello se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**.** Esta técnica aprovecha una propiedad particular de las moléculas: cuando reciben radiación infrarroja, determinados enlaces químicos absorben energía y vibran de formas características. El instrumento registra estas absorciones y genera un espectro formado por una serie de bandas. Debido a que la estructura química de cada polímero es diferente, materiales como el polietileno, polipropileno o poliestireno producen patrones espectrales distintos, que pueden considerarse una especie de "huella digital química" (figura 4).

De esta manera, los espectros obtenidos de las muestras se compararon con espectros de referencia de polímeros conocidos. La identificación no se realizó a partir de una única señal, sino considerando la coincidencia de varias bandas características del material. Este procedimiento permitió determinar qué tipos de polímeros estaban presentes en las muestras y distinguirlos de otros componentes del sedimento. La espectroscopia FTIR es una de las técnicas utilizadas para la identificación de microplásticos porque diferentes polímeros presentan firmas espectrales características que permiten establecer su composición química.

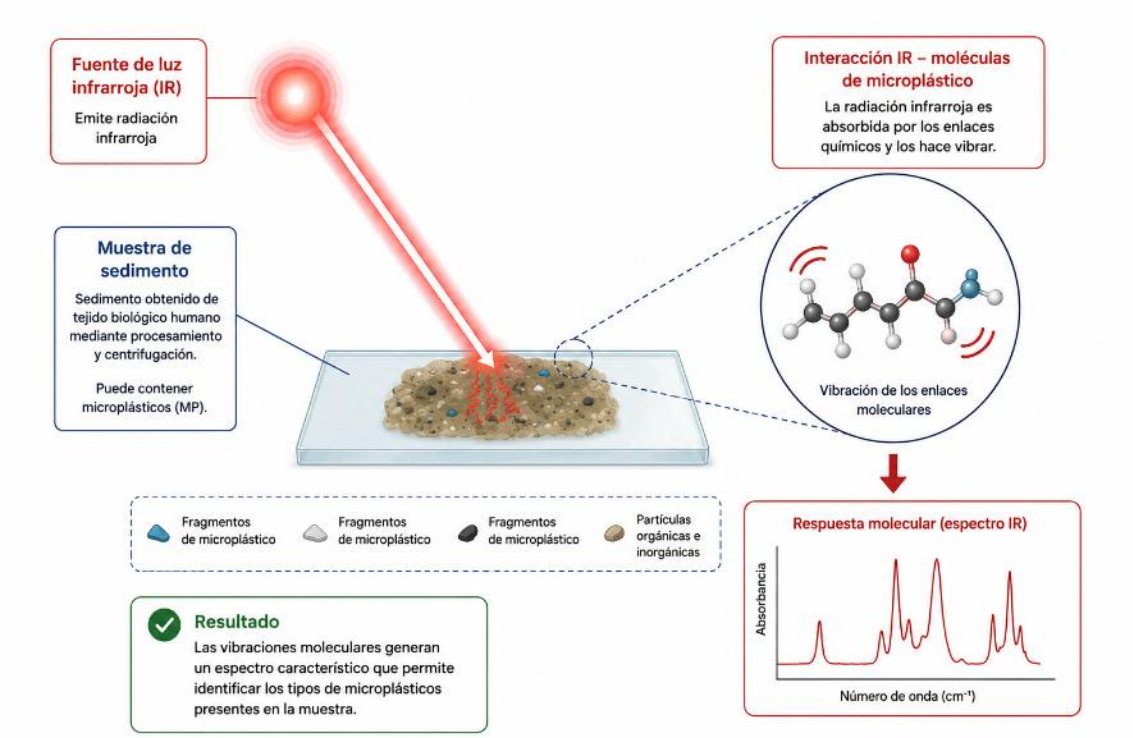


Figura 4. Principio de identificación de microplásticos mediante espectroscopía por transformada de Fourier (FTIR).

3. Resultados y discusión.

El análisis mediante espectroscopía FTIR permitió identificar siete tipos de polímeros en las muestras de placenta correspondientes a los cinco pacientes incluidos en este análisis: polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliuretano (PU) y nylon o poliamida (Pa). Una

característica relevante de los resultados fue que en una misma muestra se identificaron varios tipos de polímeros, lo que indica que la presencia de microplásticos en el tejido placentario no estuvo asociada a un único material (figura 5).

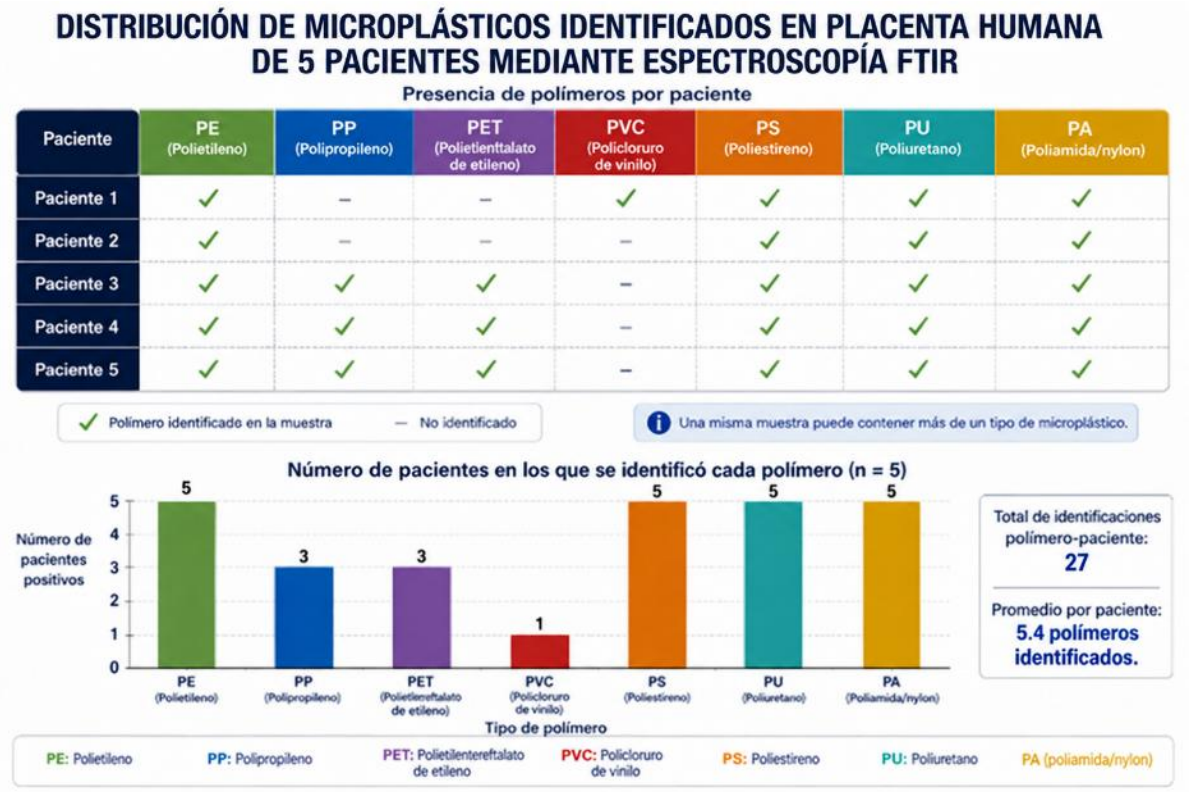


Figura 5. Presencia de polímeros identificados en muestras de placenta humana de cinco pacientes mediante espectroscopía FTIR. La gráfica muestra el número de pacientes en los que se identificó cada polímero.

En total se registraron 27 detecciones de polímero-paciente, equivalentes a un promedio de 5.4 tipos de polímeros identificados por paciente. El polietileno, el poliestireno, el poliuretano y el nylon o poliamida fueron identificados en las muestras de los cinco pacientes; el polipropileno y el PET estuvieron presentes en tres de los cinco, mientras que el PVC se identificó únicamente en una muestra. Por lo tanto, en este pequeño grupo de pacientes, algunos polímeros aparecieron de forma recurrente, mientras que otros fueron menos frecuentes.

Estos resultados son relevantes porque evidencian la coexistencia de distintos tipos de materiales plásticos en el tejido placentario**.** Sin embargo, deben interpretarse con cautela. La identificación de un polímero mediante FTIR permite conocer su composición química, pero no permite determinar por sí sola de dónde provino la partícula ni cuál fue la vía por la que llegó hasta la placenta. La exposición humana a microplásticos puede ocurrir a través de distintas fuentes ambientales y de diferentes vías, principalmente por ingestión e inhalación, por lo que establecer el origen de los materiales encontrados requerirá estudios diseñados específicamente para evaluar las posibles fuentes de exposición. Asimismo, la frecuencia con la que se identificó un determinado polímero no debe interpretarse como una medida de concentración ni de riesgo para la salud. En este análisis se registra si un tipo de polímero fue identificado en la muestra de cada paciente; por ello, que un polímero aparezca en cinco pacientes no significa necesariamente que se encuentre en mayor cantidad que otro detectado en una sola muestra. Para avanzar en la evaluación de sus posibles implicaciones biológicas, será necesario incorporar, además de la identidad química, información sobre la cantidad, el tamaño y las características de las partículas, así como relacionar estos resultados con datos clínicos y posibles fuentes de exposición.

4. Implicaciones para la salud y la investigación.

La identificación de diferentes polímeros en el tejido placentario es relevante, ya que la placenta constituye una interfaz esencial entre la madre y el feto. La presencia de microplásticos en este órgano ya ha sido documentada mediante diversas técnicas analíticas (Ragusa A., 2021, Ragusa A., 2022, Barceló D., 2023, Zhu L., 2023, Garcia M., 2024), lo que refuerza la necesidad de comprender cómo llegan estas partículas a la placenta, cómo se distribuyen en el tejido placentario y qué ocurre con ellas durante el embarazo. Estudios recientes han identificado partículas de diferentes tamaños, formas y composiciones e incluso han mostrado su presencia en compartimentos intra y extracelulares del tejido placentario (Ragusa A., 2022).

Sin embargo, detectar microplásticos en la placenta no implica demostrar que causen daño a la salud. La literatura plantea que sus posibles efectos pueden depender del tamaño, composición, concentración y características de las partículas, mientras que los mecanismos de absorción, distribución, acumulación y eliminación en el organismo aún no se conocen completamente (Barceló D., 2023, Garcia M., 2024). Por ello, nuestros resultados deben interpretarse principalmente como evidencia de la presencia e identidad química de diferentes polímeros en las muestras analizadas, y no como demostración de una relación causal con alteraciones maternas o fetales.

El siguiente paso será ampliar el número de participantes y avanzar hacia la cuantificación y caracterización de las partículas, incorporando información sobre tamaño, morfología y concentración, así como datos clínicos y posibles fuentes de exposición. Estudios previos han señalado posibles relaciones entre la exposición y factores cotidianos, como el consumo de agua y el uso de determinados productos, aunque aún se requieren muestras más grandes y controles rigurosos para establecer estas asociaciones (Barceló D., 2023, Liu S., 2023). La integración de métodos espectroscópicos y cuantitativos con información clínica será fundamental para determinar, en el futuro, las posibles implicaciones de los microplásticos en la salud materna y perinatal (Garcia M., 2024).

Conclusiones.

Los resultados de este estudio evidencian la identificación de diversos tipos de polímeros en las muestras de placenta humana analizadas. La espectroscopía FTIR permitió establecer la identidad química de los polímeros detectados; sin embargo, estos resultados no permiten determinar por sí mismos su origen, concentración ni efecto sobre la salud. Para avanzar en la comprensión de sus posibles implicaciones maternas y perinatales será necesario ampliar el número de participantes e integrar la caracterización de las partículas con información clínica y ambiental.

Agradecimientos.

Este trabajo es apoyado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) a través del proyecto CBF-2025-G-829.

Referencias bibliográficas.

Barceló, D., Picó, Y., & Alfarhan, A. H. (2023). *Microplastics: Detection in human samples, cell line studies, and health impacts*. Environmental Toxicology and Pharmacology, 101, 104204. https://doi.org/10.1016/j.etap.2023.104204

Garcia, M. A., Liu, R., Nihart, A., El Hayek, E., Castillo, E., Barrozo, E. R., Suter, M. A., Bleske, B., Scott, J., Forsythe, K., Gonzalez-Estrella, J., Aagaard, K. M., & Campen, M. J. (2024). *Quantitation and identification of microplastics accumulation in human placental specimens using pyrolysis gas chromatography mass spectrometry*. Toxicological Sciences, 199(1), 81–88. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae021

Liu, S., Guo, J., Liu, X., Yang, R., Wang, H., Sun, Y., Chen, B., & Dong, R. (2023). *Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study.* Science of the Total Environment, 854, 158699. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158699

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021). *Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta*. Environment International, 146, 106274. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274

Ragusa, A., Matta, M., Cristiano, L., Matassa, R., Battaglione, E., Svelato, A., De Luca, C., D'Avino, S., Gulotta, A., Rongioletti, M. C. A., Catalano, P., Santacroce, C., Notarstefano, V., Carnevali, O., Giorgini, E., Vizza, E., Familiari, G., & Nottola, S. A. (2022). *Deeply in Plasticenta: Presence of microplastics in the intracellular compartment of human placentas.* International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(18), 11593. https://doi.org/10.3390/ijerph191811593

Zhu, L., Zhu, J., Zuo, R., Xu, Q., Qian, Y., & An, L. (2023). *Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy.* Science of the Total Environment, 856, 159060. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159060.

Información de los autores.



Dra. Lorena Padilla Martínez. Egresada de la escuela de Medicina de la BUAP. Médico Especialista en Pediatría. Maestra en Ciencias Médicas e Investigación. Adscrita al Hospital de la Mujer de Puebla desde 2005. Actual Coordinadora del departamento de Investigación del Hospital de la Mujer. Presidenta del Comité de Ética e Investigación (CEI Hospital de la Mujer).



La **Dra. María Leonora Linares Jurad** es egresada de la Facultad de Medicina de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Mi formación como pediatra fue en el Hospital para el Niño Poblano y como neonatóloga en el Hospital de la Mujer Puebla. Cuento con dos maestrías: una en psicopedagogía y otra en investigación clínica. Fui profesora tutora de la especialidad de Neonatología de 2010 a 2015, durante dos ciclos. Fui profesora adjunta de la especialidad de Neonatología y profesora titular de la especialidad de Neonatología de 2024 a 2025. Actualmente, jefa de enseñanza del Hospital de la Mujer Puebla; cuento con folio de instructora en Reanimación Neonatal desde 2010 hasta agosto de 2024, avalado por el Sector Salud. Actualmente vigente como instructora de NRP, avalada por la AHA. Profesora colaboradora en la Facultad de Medicina de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla desde 2023. Fui instructora de ReNeo en la Sociedad Mexicana de Pediatría.



La **Dra. Paola Guadalupe Gordillo Guerra** es Profesora-Investigadora de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Doctora en Ciencias Químicas, es integrante del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, Nivel 1, y cuenta con Perfil Deseable PRODEP desde 2026. Su trayectoria científica se ha desarrollado en México y Francia, con estancias de investigación en la Université Pierre et Marie Curie y la Université Paris Descartes. Su trabajo articula la química orgánica, la fitoquímica, la química analítica y la química supramolecular para abordar problemas de interés biológico y ambiental. Actualmente investiga plantas medicinales, especialmente especies de uso tradicional en Chiapas, la caracterización de metabolitos bioactivos y el análisis de microplásticos mediante espectroscopía infrarroja. Su labor integra investigación, docencia, formación de recursos humanos y divulgación científica.



El **Dr. Julio César Ramírez San Juan** es investigador titular "C" del INAOE e Investigador Nacional Nivel 3. Estudió la licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, la maestría y el doctorado en ciencias en el INAOE y realizó un postdoctorado en el Beckman Laser Institute de la Universidad de California, Irvine (USA). El área de interés del Dr Ramírez es la óptica estadística y la biofotónica.



El **Dr. Orlando Zaca Moran,** cuenta con más de 25 artículos JCR, más de 200 citas y un índice h de 10. He dirigido trabajos de titulación de maestría y de licenciatura. Ha participado como evaluador de proyectos SECIHTI. Cuenta, con 1 título de patente, una solicitud más de patentes, más de 30 congresos nacionales e internacionales. He formado parte de 22 proyectos con financiamiento interno del IPN, se cuenta con un proyecto financiado por SECIHTI del cual soy el responsable técnico (2023-2025), He participado en un proyecto con la dependencia federal de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA). Actualmente me encuentro desarrollando apósitos para regeneración de heridas cutáneas empleando membranas electrohiladas con extractos de plantas medicinales, así como biomarcadores de interés en áreas biomédicas mediante la fluorescencia de puntos cuánticos de óxido de grafeno obtenidos vía síntesis verde**.**



Dr. Raúl Jacobo Delgado Macuil. Estudió la licenciatura en Electrónica en la FCMF de la BUAP, México, y obtuvo su doctorado en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, con especialidad en óptica. Sus líneas de investigación se desarrollan en la generación de biosensores ópticos (utilizando anticuerpos, enzimas y anti-mRNA), en matrices cilíndricas y planares, para la determinación de analitos de interés en las áreas de la salud, medio ambiente y alimentos en el campo de la biotecnología.



Dr. Juan Castillo Mixcóatl. Egresado de la licenciatura en Electrónica en la BUAP, la Maestría en Ciencias se obtuvo en el CICESE y el grado de doctorado en ciencias fue obtenido en el INAOE. Los intereses actuales del investigador son el desarrollo de sistemas y sensores de medición remota, no contacto y no destructivos, además de la incorporación de herramientas de aprendizaje de máquina en el análisis de las respuestas de los sistemas y sensores desarrollados.



Dr. Juan Pablo Padilla Martínez. Profesor-investigador del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla con formación en Física Aplicada y Doctorado en Ciencias Exactas (Óptica) por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Cuenta con estancias internacionales en la Universidad de California en Riverside (USA) y en Harvard Medical School–Massachusetts General Hospital (USA), donde consolidó líneas de investigación en biofotónica, interacción luz-materia, termocavitación, microfluídica y sensores ópticos.

Clasificación inteligente de lesiones en la piel mediante descriptores y transformadas matemáticas.

Intelligent Classification of Skin Lesions Using Descriptors and Mathematical Transforms.

Luis Felipe López Ávila (1).
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, B. C., México.
lopezf@cicese.edu.mx.

Esperanza Guerra Rosas (2). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, B. C., México.
eguerra@cicese.edu.mx.

Josué Álvarez Borrego* (3). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, B. C., México.
josue@cicese.edu.mx.

Esbanyely Garza Flores (4). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE), Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, B. C., México.
egarza@cicese.edu.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 10, 2026.

Resumen.

La piel es el órgano más grande del cuerpo y, a la vez, una de las primeras señales de nuestra salud. Detectar a tiempo una lesión maligna puede marcar la diferencia entre un tratamiento sencillo y una enfermedad grave. En nuestras investigaciones desarrollamos un método que enseña a la computadora a distinguir entre ocho tipos de lesiones de la piel a partir de fotografías digitales. La idea central es novedosa: en lugar de darle a la máquina la imagen completa, la convertimos en una "huella" numérica, una firma matemática, que resume las características esenciales de cada lesión y que no cambia aunque la fotografía esté rotada, alejada o desplazada. Con esa estrategia obtuvimos clasificaciones muy precisas usando incluso una computadora portátil común, lo que abre la puerta a herramientas de apoyo al diagnóstico dermatológico que sean rápidas, no invasivas y económicas.

Palabras clave: Apoyo al diagnóstico, clasificaciones, firma matemática, lesiones de la piel.

Abstract.

The skin is the largest organ in the body and one of the earliest indicators of our health. Detecting a malignant lesion early can be the difference between a simple treatment and a serious disease. In our research, we developed a method that teaches computers to distinguish among eight types of skin lesions from digital photographs. The core idea is novel: instead of feeding the machine the whole image, we turn it into a numerical "fingerprint", a mathematical signature, that summarizes the essential features of each lesion and does not change even if the photograph is rotated,

zoomed, or shifted. With this strategy, we achieved highly accurate classifications using even an ordinary laptop, paving the way toward diagnostic-support tools for dermatology that are fast, non-invasive, and inexpensive.

Keywords: Classifications, diagnostic-support, mathematical signature, skin lesions.

1. El problema: una piel que habla, pero que no siempre entendemos.

La piel nos cubre, nos protege del ambiente y, muchas veces, nos avisa cuando algo anda mal. Con el paso del tiempo y la exposición al sol aparecen manchas, lunares y crecimientos de todo tipo. La mayoría son inofensivos, pero algunos no lo son. El cáncer de piel es una de las enfermedades más frecuentes en el mundo, y su detección temprana es determinante para el pronóstico del paciente.

El reto es que muchas lesiones se parecen entre sí. Un lunar común (nevus melanocítico) puede confundirse a simple vista con un melanoma, el más agresivo de los cánceres de piel. Existen además otras lesiones frecuentes que conviene diferenciar: el carcinoma basocelular, el carcinoma de células escamosas, la queratosis actínica, la queratosis benigna, el dermatofibroma y las lesiones vasculares. En total, nuestro trabajo aborda los ocho tipos de lesiones que se resumen en la Tabla 1. Distinguirlas requiere experiencia, y el ojo humano tiene límites.

Tabla 1. Los ocho tipos de lesiones de la piel analizados en nuestros estudios.

Abreviación	Lesión	Naturaleza
BCC	Carcinoma basocelular	Cáncer (el más frecuente; crecimiento lento)
SCC	Carcinoma de células escamosas	Cáncer (el segundo más común)
MEL	Melanoma	Cáncer (el más agresivo)
AK	Queratosis actínica	Lesión precancerosa (por exposición solar)
BKL	Queratosis benigna	Benigna
DF	Dermatofibroma	Benigna
NV	Lunar / nevus melanocítico	Benigna (la más común)
VASC	Lesión vascular	Benigna (de los vasos sanguíneos)

Aquí es donde entra la inteligencia artificial. Si se le muestran suficientes ejemplos, una computadora puede aprender a reconocer patrones visuales que a nosotros nos cuesta describir con palabras. Nuestro trabajo se sitúa justo en ese punto: usar el procesamiento de imágenes y la inteligencia artificial para apoyar el diagnóstico dermatológico de forma automática, rápida y sin necesidad de procedimientos invasivos.

2. La idea central: de la imagen a la “huella” matemática.

La forma más popular de clasificar imágenes con computadoras son las redes neuronales convolucionales, muy potentes pero también muy exigentes en cómputo. Además tienen una debilidad importante para este problema: si la misma lesión aparece girada, más lejos o descentrada en la foto, la máquina puede “verla” como algo distinto. En imágenes de piel, donde las lesiones varían enormemente en tamaño, forma y orientación, lo cual representa un reto a considerar.

Nuestra propuesta toma otro camino. En lugar de trabajar con la imagen completa, la transformamos en una firma: una secuencia de números que funciona como una huella dactilar de la lesión. Dos fueron los principios que guiaron el diseño de esa firma:

- **Que resuma lo esencial.** La firma condensa la información de color, textura y estructura de la lesión en un vector de apenas cientos de valores, mucho más ligero de procesar que una fotografía entera.
- **Que sea estable.** La huella debe ser prácticamente la misma aunque la fotografía cambie de escala, esté desplazada o rotada. Esta propiedad, llamada invariancia, es la que da robustez al método.Para lograr esa

estabilidad recurrimos a herramientas matemáticas conocidas como transformadas integrales, cada una encargada de dar consistencia a la firma frente a un tipo de variación:

- La **transformada de Fourier** aporta estabilidad frente a desplazamientos (que la lesión no esté centrada).
- La **transformada de Mellin** aporta estabilidad frente a cambios de tamaño (que la foto se haya tomado más cerca o más lejos).
- La **transformada radial de Hilbert** aporta estabilidad frente a rotaciones (que la lesión aparezca girada).

A esto sumamos un descriptor de textura llamado Patrón Binario Local (LBP), que capta detalles finos de la superficie de la piel; bordes, manchas, zonas rugosas o lisas, comparando cada punto de la imagen con sus vecinos.

Un detalle que resultó clave: en vez de analizar la imagen en blanco y negro, la separamos en sus canales de color rojo, verde y azul, más una versión en escala de grises, y calculamos la firma en cada uno. Cada canal aporta información distinta; el rojo resalta la pigmentación, el verde las estructuras intermedias y el azul las texturas finas, y juntarlos permite captar diferencias muy sutiles entre lesiones. El resultado de todo este proceso es una firma de 444 valores por imagen.

3. Cómo lo hicimos y qué encontramos.

Para entrenar y poner a prueba el método usamos un banco público de imágenes dermatológicas reconocido internacionalmente (la colaboración ISIC, en su edición 2019), que reúne miles de fotografías de ocho tipos de lesiones.

Primero depuramos las imágenes con demasiado "ruido"; vellos, marcas de regla u otros objetos que dificultan el análisis. Como esto redujo mucho el material disponible y algunas clases quedaban con muy pocos ejemplos, aplicamos una técnica llamada aumento de datos: generamos variantes de cada imagen rotándola y cambiándole el tamaño de forma controlada. Así conseguimos un conjunto amplio y equilibrado, con el mismo número de ejemplos por cada tipo de lesión (1 840 imágenes por clase) para evitar que la máquina se sesgara hacia las clases más numerosas.

Nuestra investigación avanzó en dos etapas complementarias.

3.1 Primera etapa: probar muchos "cerebros" clasificadores.

Una vez convertidas las imágenes en firmas, entrenamos once modelos distintos de inteligencia artificial; variantes de máquinas de soporte vectorial (SVM), del método de vecinos más cercanos (k-NN) y de clasificadores de conjunto, para ver cuál aprovechaba mejor las firmas. Todos dieron resultados muy satisfactorios, como se ve en la figura 1, y el mejor fue un modelo llamado *subspace k-NN*. Para asegurarnos de que estos números no eran fruto del azar, repetimos todo el proceso 30 veces y reportamos los promedios con su margen de variación.
El mejor clasificador de esta etapa, el *subspace k-NN*, logró resultados casi perfectos en las cuatro medidas que usamos habitualmente para evaluar un sistema de diagnóstico (Tabla 2).

Tabla 2. Desempeño del mejor modelo de la primera etapa (*subspace k-NN*) sobre el conjunto de prueba, promediado en las ocho lesiones tras 30 repeticiones.

Métrica	Descripción de la medición	Resultado
Exactitud	Aciertos otals del sistema	99.99 %
Sensibilidad	Detectar la lesión cuando sí está presente	99.96 %
Especificidad	No dar falsas alarmas cuando no está	99.99 %
Precisión	Confiabilidad de cada diagnóstico positivo	99.95 %

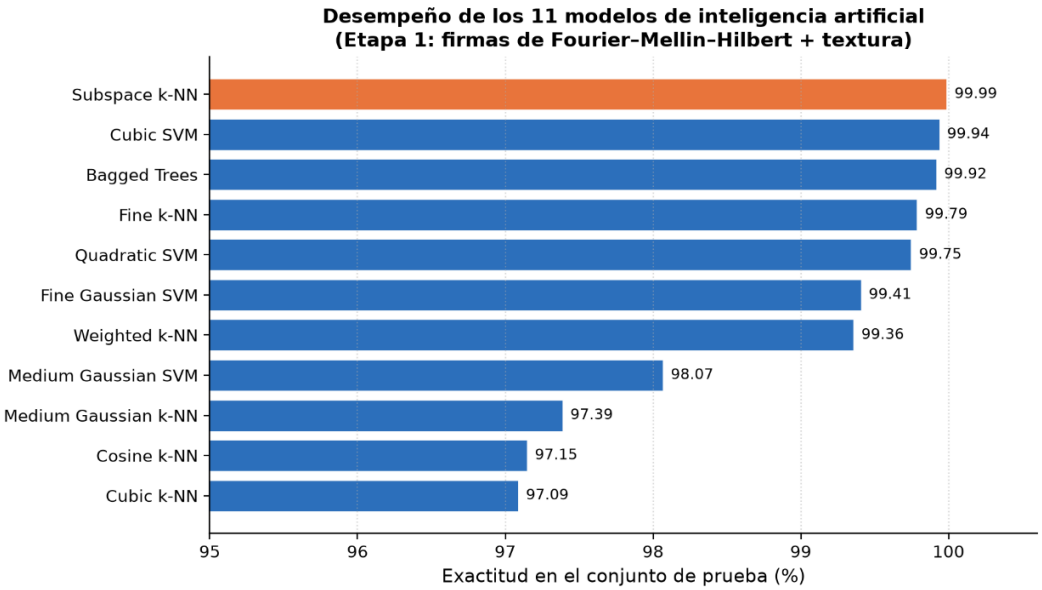


Figura 1. Exactitud alcanzada por los once modelos de inteligencia artificial sobre el conjunto de prueba. Incluso el más modesto supera el 97 %, y el modelo subspace k-NN (en naranja) alcanza prácticamente el 100 %.

3.2 Segunda etapa: añadir un nuevo ingrediente y afinar el método.

En un trabajo posterior incorporamos una herramienta matemática adicional, la transformada de Hermite, especializada en captar detalles espaciales localizados como los bordes y las texturas finas de la lesión. La combinamos con las transformadas anteriores sobre los canales de color y usamos una red neuronal para clasificar. Este enfoque híbrido; que une lo mejor de la información global (las transformadas invariantes) con la información local (Hermite y textura), alcanzó una exactitud global cercana al 95 % sobre el conjunto de prueba.

Un hallazgo interesante de esta segunda etapa fue *dónde* acertaba y dónde dudaba el sistema (figura 2). Reconoció casi a la perfección la queratosis actínica, el dermatofibroma, las lesiones vasculares y el carcinoma de células escamosas. En cambio, mostró más dificultad para separar el melanoma del lunar común, precisamente las lesiones que también confunden al ojo humano por su gran parecido. Es un recordatorio honesto de que la herramienta refleja la dificultad real del problema, no la elimina por arte de magia.

Para dimensionar el desempeño de este método híbrido, la Tabla 3 resume sus principales métricas globales.

Tabla 3. Desempeño global del método híbrido (segunda etapa), promediado en las ocho lesiones tras 30 repeticiones.

Métrica	**Resultado**
Exactitud	95.33 %
Especificidad	97.33 %
Sensibilidad	81.24 %
Precisión	80.77 %
Puntaje F1 (balance precisión/sensibilidad)	80.82 %
Tasa de falsas alarmas	2.67 %

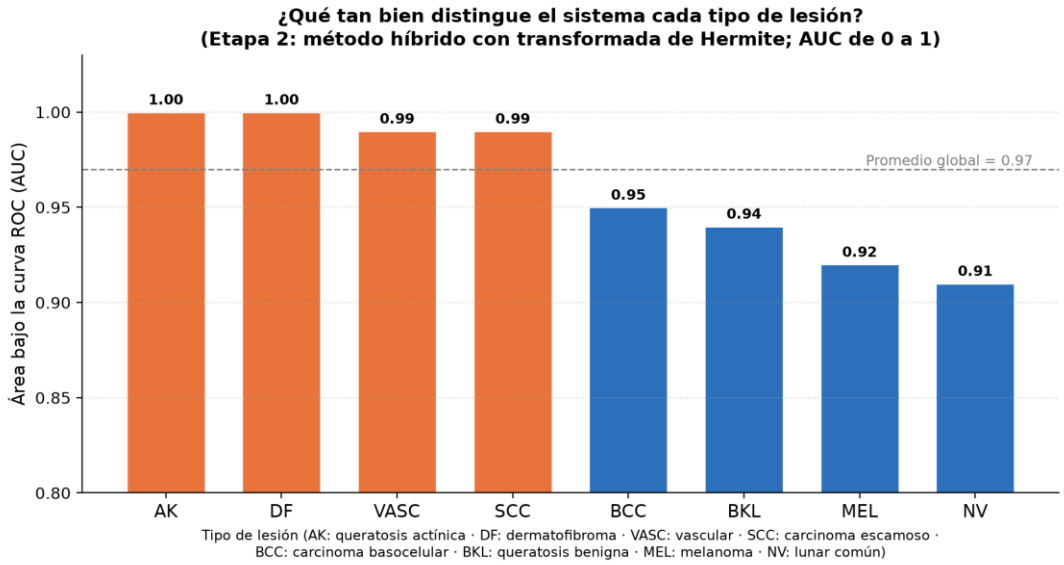


Figura 2. Capacidad del método híbrido para distinguir cada tipo de lesión, medida con el área bajo la curva ROC (AUC), donde 1.00 es la separación perfecta. Las lesiones en verde se identifican casi sin error; el melanoma (MEL) y el lunar común (NV), en naranja, son las más difíciles por su parecido visual.

Igual de importante es que el método destacó por su bajo número de falsas alarmas (una tasa de falsos positivos de apenas 2.67 %). En medicina esto es valioso: reduce diagnósticos positivos incorrectos que podrían generar angustia o tratamientos innecesarios al paciente.

Finalmente, comparamos nuestro método con varios modelos de referencia del estado del arte (redes neuronales profundas muy conocidas) sobre el mismo tipo de imágenes. Como muestra la figura 3, nuestro enfoque obtuvo la mayor exactitud del grupo.

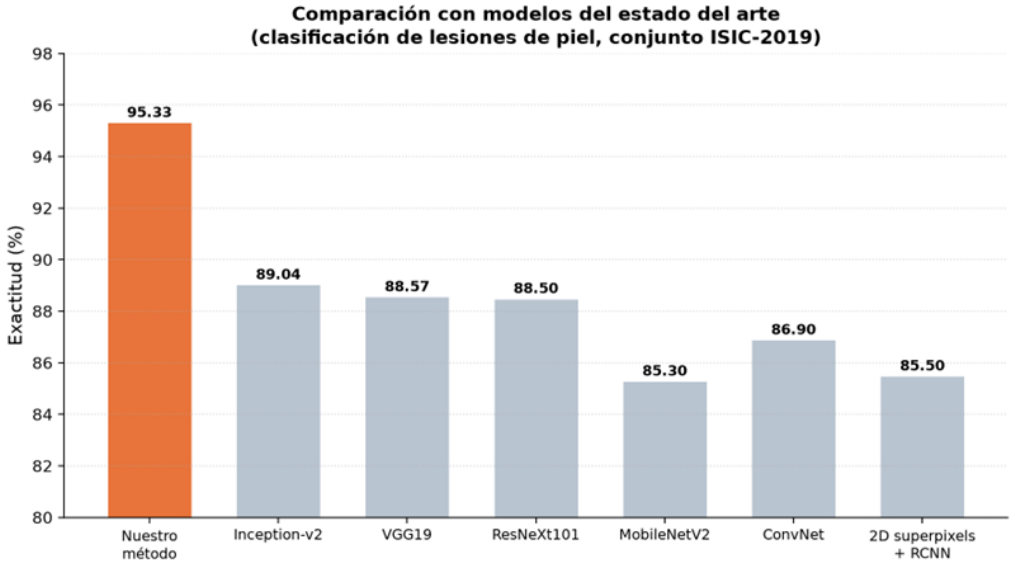


Figura 3. Comparación de la exactitud de nuestro método (naranja) frente a modelos del estado del arte para la clasificación de lesiones de piel. Además de la mayor exactitud, nuestro método aporta información que otros trabajos no reportan, como la especificidad (97.33 %) y la baja tasa de falsas alarmas.

4. Por qué importa: rapidez, sencillez y accesibilidad.

Quizá lo más prometedor no sean solo las cifras, sino cómo se obtuvieron. Todo el proceso se ejecutó en una computadora portátil común, sin equipo especializado. Los tiempos hablan por sí solos (Tabla 4): generar la firma de una imagen toma fracciones de segundo, y una vez entrenado, el sistema clasifica una lesión casi instantáneamente. Esto sugiere que la técnica podría llevarse a escenarios reales donde se necesite un análisis rápido y de bajo costo.

Tabla 4. Tiempos del método híbrido en una computadora portátil común (procesador Intel Core i5 de doble núcleo a 1.6 GHz, 8 GB de memoria).

Tarea	**Tiempo aproximado**
Generar la firma de una imagen (320 × 320)	0.30 segundos
Entrenar la red neuronal (una sola vez)	488 segundos (~8 minutos)
Clasificar una firma	0.000018 segundos

Frente a métodos más pesados basados en redes neuronales convolucionales, nuestro enfoque ofrece un equilibrio atractivo: firmas ligeras, estables ante giros y cambios de tamaño, y un costo de cómputo modesto, manteniendo al mismo tiempo una precisión competitiva con modelos del estado del arte.

Y hay algo más: la idea de convertir imágenes en firmas invariantes no es exclusiva de la piel. En principio podría aplicarse a otras tareas de imagen médica y más allá. Eso convierte a estas “huellas matemáticas” en una herramienta versátil con mucho camino por recorrer.

Conclusiones.

Enseñar a una computadora a reconocer lesiones de la piel no consiste necesariamente en mostrarle millones de fotografías y esperar que aprenda por fuerza bruta. Nuestro trabajo muestra que, con las matemáticas adecuadas, se puede traducir cada imagen a una firma compacta y estable que captura lo esencial de la lesión. Combinando transformadas integrales (Fourier, Mellin y Hilbert), la transformada de Hermite, descriptores de textura y el análisis por canales de color, logramos clasificar ocho tipos de lesiones con alta precisión y pocas falsas alarmas, usando recursos de cómputo modestos.

Estos resultados apuntan hacia herramientas de apoyo al diagnóstico dermatológico que sean no invasivas, rápidas y accesibles. No sustituyen al médico; la confusión entre melanoma y lunar común lo deja claro, pero sí pueden convertirse en un valioso segundo par de ojos que contribuya a la detección temprana del cáncer de piel y, con ello, al cuidado del paciente.

Créditos.

Estas investigaciones se realizaron en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE), con financiamiento institucional, así como el apoyo de la SECIHTI.

Referencias bibliográficas.

Guerra-Rosas, E.; López-Ávila, L. F.; Garza-Flores, E.; Vidales-Basurto, C. A.; Álvarez-Borrego, J. (2023). *Classification of Skin Lesion Images Using Artificial Intelligence Methodologies through Radial Fourier–Mellin and Hilbert Transform Signatures.* Applied Sciences, 13(20), 11425. https://doi.org/10.3390/app132011425.

López-Ávila, L. F.; Álvarez-Borrego, J. (2025). *Hybrid Transform-Based Feature Extraction for Skin Lesion Classification Using RGB and Grayscale Analysis*. Applied Sciences, 15(11), 5860. https://doi.org/10.3390/app15115860.

Información de los autores.



Luis Felipe López Ávila es Físico egresado de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Obtuvo los grados de Maestría y Doctorado en Ciencias en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), donde desarrolló su formación en la línea de investigación de procesamiento de imágenes digitales. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. (CICESE) y es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) en el nivel candidato.



Esperanza Guerra Rosas obtuvo los grados de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Durango, México. Así como su Doctorado en Física en el Departamento de Investigación en Física en la Universidad de Sonora, México. Sus líneas de investigación incluyen el procesamiento de imágenes, el reconocimiento de patrones y algoritmos de Inteligencia Artificial. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., en la División de Física Aplicada. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII nivel 1).



Josué Álvarez Borrego obtuvo el título de Licenciado en Oceanografía Física en la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC (Ensenada, México), y los grados de Maestro y Doctor en Óptica en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE, México). Actualmente es profesor Titular E en la División de Física Aplicada, Departamento de Óptica, del CICESE. Sus intereses de investigación incluyen el procesamiento de imágenes con aplicaciones en biología y medicina. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII, nivel 3), de la Academia Mexicana de Ciencias y de OPTICA (anteriormente OSA).



Esbanyely Garza Flores es egresado como Ingeniero en Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en Óptica en el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) en 2018, y el de Maestro en Ciencias en Óptica en 2014. Ha realizado investigación en las áreas de óptica, reconocimiento de patrones, Ciencia de datos e inteligencia artificial. Produciendo artículos en revistas internacionales. Al momento se encuentra en una estancia posdoctoral en el grupo de Procesamiento de Imágenes del departamento de Óptica de la División de Física aplicada del CICESE, en investigación sobre la identificación de organismos marinos, como el fitoplancton, y de enfermedades, como el cáncer de piel, mediante el análisis de imágenes.

Sensores de fibra óptica para el sector aeronáutico: fundamentos y aplicaciones en estructuras y motores.

Fiber-Optic Sensors for the Aeronautical Sector: Fundamentals and Applications in Structures and Aero-Engines.

Joseba Zubia*(1).
Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España.
joseba.zubia@ehu.eus.

Gotzon Aldabaldetreku (2). Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España.
gotzon.aldabaldetreku@ehu.eus.

Gaizka Durana (3). Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España. gaizka.durana@ehu.eus.

O. Arrizabalaga (4). Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España. oskar.arrizabalaga@ehu.eus.

J. Amorebieta (5). Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España. josu.amorebieta@ehu.eus.

Gorka Zubia (6). Grupo de Fotónica Aplicada-Applied Photonics Group, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), Bilbao, España. gorka.zubia@ehu.eus.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 01, 2026; aceptado en octubre 20, 2026.

Resumen.

La fibra óptica ha evolucionado desde su función tradicional como medio de comunicación hasta convertirse en una plataforma de sensado especialmente atractiva para el sector aeronáutico. Su pequeño tamaño, bajo peso, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, aislamiento galvánico y capacidad de multiplexación permiten medir deformación, temperatura, vibración, desplazamiento, impacto y parámetros asociados al funcionamiento de los motores. Este artículo presenta los fundamentos físicos de los sensores de fibra óptica y organiza sus aplicaciones en tres bloques. El primero aborda sondas reflectivas moduladas en intensidad para medir la holgura y el tiempo de llegada de los álabes, incluida la ampliación del rango mediante haces de fibras multifurcados. El segundo analiza las redes de Bragg para monitorización estructural, con especial atención a la sensibilidad cruzada deformación-temperatura, la medida en vuelo, la detección de impactos, hielo y forma. El tercero revisa las fibras ópticas poliméricas y microestructuradas para grandes deformaciones y redes de bajo coste. Se discuten resultados representativos obtenidos en bancos de ensayo y motores reales, así como los retos de integración, calibración, encapsulado, certificación y explotación de datos necesarios para trasladar estas tecnologías a sistemas aeronáuticos operativos.

Palabras clave: Blade tip clearance, Blade tip timing, fibra óptica polimérica, monitorización de la salud estructural, motores aeronáuticos, redes de Bragg, sensores de fibra óptica.

Abstract.

Optical fiber has evolved from its traditional role as a communications medium into a sensing platform that is particularly attractive for aeronautics. Its small size, low weight, immunity to electromagnetic interference, galvanic isolation and multiplexing capability enable the measurement of strain, temperature, vibration, displacement, impact and aero-engine operating parameters. This paper presents the physical foundations of fiber-optic sensors and organizes their aeronautical applications into three blocks. The first addresses reflective intensity-modulated probes for blade-tip clearance and blade-tip timing, including range extension through multifurcated fiber bundles. The second examines fiber Bragg gratings for structural health monitoring, with emphasis on strain-temperature cross-sensitivity, in-flight measurements, impact, icing and shape detection. The third reviews polymer and microstructured optical fibers for large-strain sensing and low-cost sensor networks. Representative results obtained on test rigs and real engines are discussed, together with the integration, calibration, packaging, certification and data-exploitation challenges that must be solved to transfer these technologies to operational aircraft systems.

Keywords: Aero-engines, blade tip clearance, blade tip timing, fiber Bragg gratings, fiber-optic sensors, polymer optical fiber, structural health monitoring.

1. Introducción y alcance.

Cuando se menciona una fibra óptica, la primera asociación suele ser la transmisión de información. Sin embargo, la misma guía de ondas que transporta datos puede convertirse en un elemento sensible: una perturbación externa modifica alguna propiedad de la luz y esa variación se relaciona, después de una calibración, con la magnitud de interés. En una aeronave, esta posibilidad es especialmente valiosa porque alas, fuselaje, motores, superficies de control y sistemas auxiliares están sometidos de manera simultánea a cargas mecánicas, vibraciones, gradientes térmicos, presión, humedad e impactos.

La monitorización de la salud estructural —Structural Health Monitoring, SHM— busca complementar las inspecciones periódicas con información adquirida durante la vida útil del componente. La fibra óptica aporta una infraestructura de medida ligera, pasiva en el punto de sensado y capaz de alojar muchos sensores sobre un mismo enlace. Además, al transportar fotones y no corriente eléctrica, presenta inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y permite separar físicamente la electrónica de interrogación de la zona sometida a condiciones adversas (Gómez et al., 2009, García et al., 2015).

2. Fundamentos de la fibra óptica y del sensado fotónico.

Una fibra de sílice convencional está formada por un núcleo con índice de refracción ligeramente superior al del revestimiento. En una fibra monomodo de telecomunicaciones, el diámetro del núcleo se sitúa típicamente en torno a 8–10 µm y el diámetro exterior del revestimiento es de 125 µm. El aumento del índice del núcleo se consigue habitualmente mediante dopantes como el germanio. La diferencia de índices confina el campo óptico y permite que la energía se propague a lo largo de distancias muy grandes.

La interpretación geométrica se basa en la reflexión total interna, aunque el tratamiento modal requiere resolver las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno de la guía. El número normalizado V permite anticipar cuántos modos puede soportar una fibra de índice escalón $V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$ donde a es el radio del núcleo, λ la longitud de onda en el vacío y n_{co}, n_{cl} son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente. Para $V < 2{,}405$

la guía opera en régimen monomodo. La selección entre fibra monomodo y multimodo no es secundaria: afecta al tamaño del campo, al ruido modal, a la capacidad de acoplamiento y a la respuesta de muchos sensores reflectivos.

¿Qué es un sensor de fibra óptica?

Un sensor de fibra óptica utiliza la fibra como elemento sensible y como canal para llevar y recoger la luz. La magnitud física, química o biológica puede modificar la intensidad, la fase, la polarización, la frecuencia o longitud de onda, o el tiempo de vuelo. En un sensor intrínseco la interacción se produce dentro de la propia fibra; en uno extrínseco la fibra ilumina una región externa y recoge la radiación resultante. Según su extensión espacial, los sensores pueden ser puntuales, cuasi distribuidos —varios puntos discretos sobre una fibra— o distribuidos, cuando se recupera información de manera casi continua a lo largo del enlace (García et al., 2015). Ver figura 1.



Figura 1. Cadena funcional de un sensor de fibra óptica: fuente, fibra o región de sensado, fotodetección y procesamiento de la señal.

Ventajas y límites en aeronáutica.

Las ventajas más relevantes son el bajo peso, el tamaño reducido, la inmunidad electromagnética, la posibilidad de operar a distancia y la multiplexación. Una sola fibra puede integrar sensores de naturaleza distinta y transportar la información hasta una zona protegida. En materiales compuestos reforzados con fibra de carbono, las fibras pueden adherirse a la superficie o integrarse durante la fabricación, de modo que la estructura aporte información sobre su propio estado (Gómez et al., 2009, García et al., 2015). Ver figura 2.

3. Sensores de fibra óptica en motores aeronáuticos.

Holgura y tiempo de llegada de los álabes.

En un compresor o una turbina, dos parámetros resumen una parte importante del comportamiento del rotor. La holgura de punta de álabe —Blade Tip Clearance, BTC o TC— es la distancia entre el extremo del álabe y la carcasa. Una holgura excesiva favorece las fugas de aire o gas y reduce la eficiencia; una holgura demasiado pequeña aumenta el riesgo de roce, calentamiento, desgaste y daño estructural. El objetivo de diseño es, por tanto, un compromiso controlado y dependiente del régimen de operación (García et al., 2013; 2015; 2016; 2017).

El tiempo de llegada de punta —Blade Tip Timing, BTT o TT— registra el instante en que cada álabe pasa frente a una sonda fija. Al comparar ese instante con el correspondiente a una rotación ideal, se estima la deflexión tangencial y se obtienen indicadores de vibración. A diferencia de una galga adherida, BTT es una técnica no intrusiva y puede monitorizar todos los álabes, aunque el muestreo es irregular y requiere algoritmos específicos (García et al., 2013; 2016). Ver figura 3.

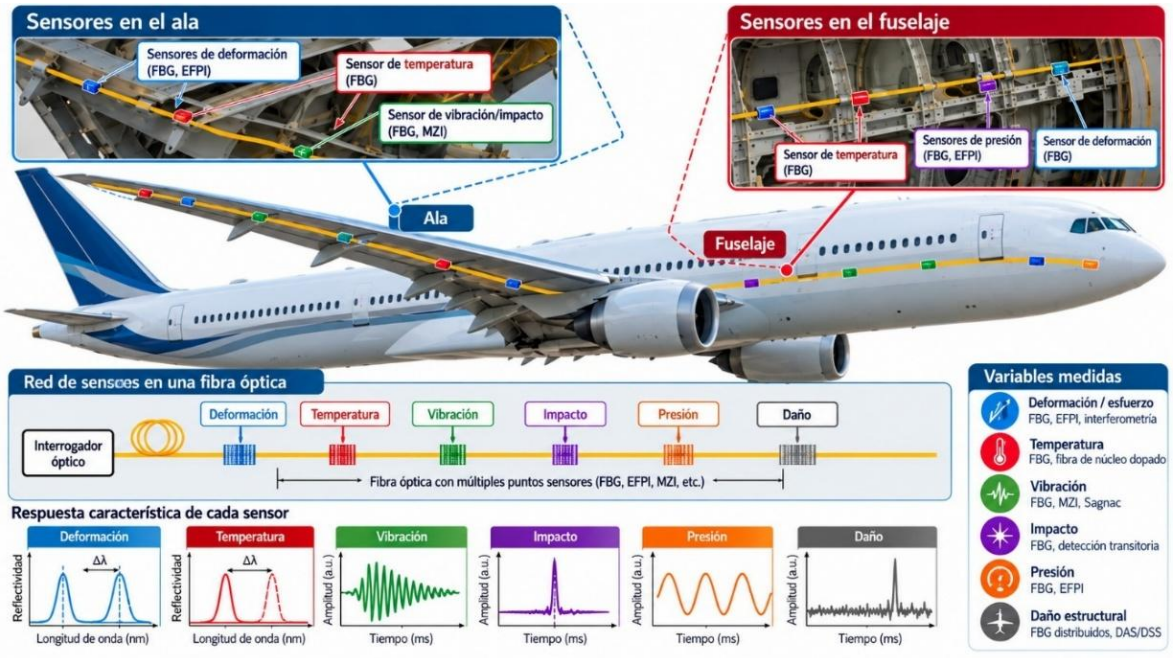


Figura 2. Ejemplo de una red de sensores ópticos para alas y fuselaje, con medidas de deformación, temperatura, vibración, impacto y presión.

Sondas reflectivas moduladas en intensidad.

Una solución compacta consiste en una sonda formada por un haz o bundle de fibras. Una fibra central emite luz sobre la superficie del álabe y uno o varios anillos de fibras receptoras recogen la potencia reflejada. La expansión del haz, el desplazamiento del punto reflejado y el solapamiento con cada anillo hacen que las tensiones de los fotodetectores dependan de la separación. En configuraciones con varios canales se emplean cocientes normalizados, por ejemplo, $\eta(z) = V_2/V_1$, para reducir el efecto de variaciones comunes de potencia, reflectividad o ganancia (García, 2013; 2015; 2017).

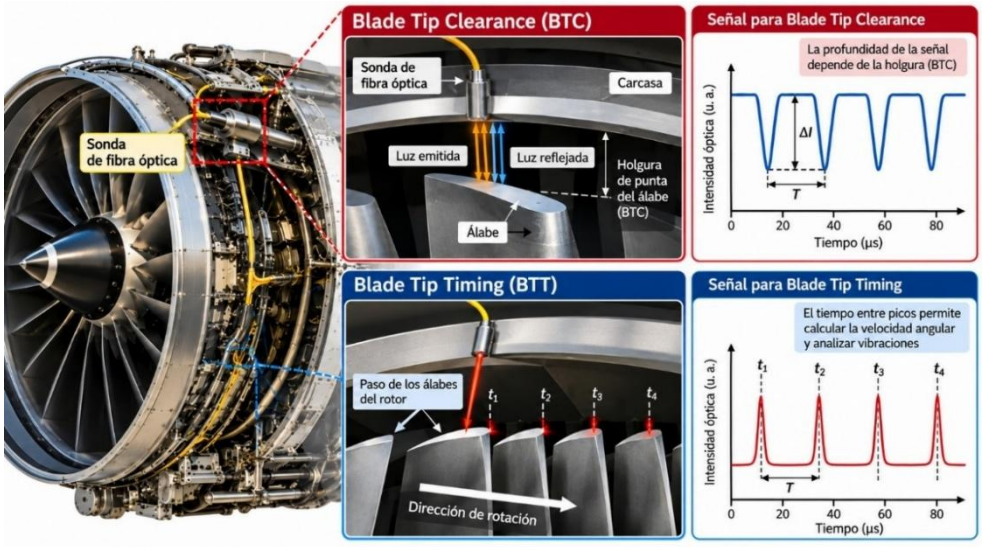


Figura 3. Principio conceptual de las medidas BTC y BTT mediante sondas ópticas instaladas en la carcasa del motor.

La curva $\eta(z)$ presenta una zona muerta próxima a la sonda, un intervalo aproximadamente lineal y una región de saturación. La geometría del bundle —diámetro de las fibras, radio de los anillos, número de fibras y apertura numérica— determina la posición y anchura de estas regiones. El trabajo experimental y teórico desarrollado sobre sondas trifurcadas y tetrafurcadas mostró que la respuesta puede diseñarse de forma predictiva y que la iluminación monomodo reduce el ruido modal (García et al., 2013; 2015; 2017). Ver figura 4.

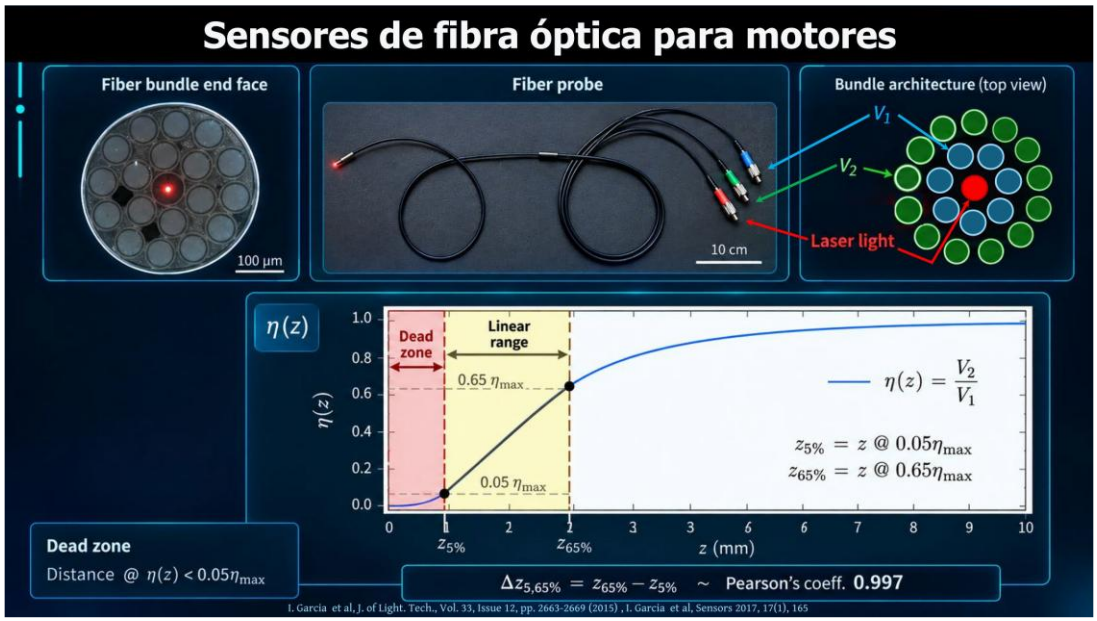


Figura 4. Cabeza de un sensor reflectivo, arquitectura de anillos receptores y definición gráfica de zona muerta y rango lineal.

Extensión del rango mediante haces pentafurcados.

El rango útil puede ampliarse añadiendo anillos receptores cuyas respuestas máximas aparezcan a distancias diferentes y combinando sus cocientes de manera ponderada. Esta estrategia evita instalar varias sondas en carcasas con poco espacio y permite cubrir etapas del motor cuyos valores nominales de BTC no coinciden. En el diseño pentafurcado presentado en la figura 5, la respuesta combinada alcanza un intervalo lineal de 10,49 mm, con una zona muerta caracterizada por $z_5\%\approx 2{,}55$ mm y una pendiente de 2,20 mm^{-1} (Zubia et al., 2025). Estos valores pertenecen a esa geometría concreta y no deben interpretarse como propiedades universales de cualquier bundle.

Del pulso óptico al diagnóstico vibratorio.

Cada paso de álabe produce un pulso cuya amplitud contiene información de holgura y cuyos flancos permiten estimar los instantes de llegada y salida. Entre los procedimientos empleados se encuentran el cruce de umbral, el análisis de la segunda derivada y estimadores adaptativos. Una vez identificado el álabe i en la revolución r, la deflexión tangencial puede aproximarse mediante la ecuación (1):

$$\delta_{r,i} \approx R\Omega_r(t_{r,i} - t_{r,i}^0) \qquad (1)$$

donde R es el radio de medida, Ω_r la velocidad angular, $t_{r,i}$ el instante real y $t_{r,i}^0$ el instante teórico. El signo depende de la convención adoptada. Representar estas deflexiones frente al número de álabe y la velocidad genera un blade waterfall: las desviaciones coherentes ayudan a localizar resonancias síncronas, mientras que el ensanchamiento

revolución a revolución revela componentes asíncronas. Una transformada de Fourier sobre la secuencia all-blade permite seguir ondas viajeras y órdenes de motor (García et al., 2013; 2016).

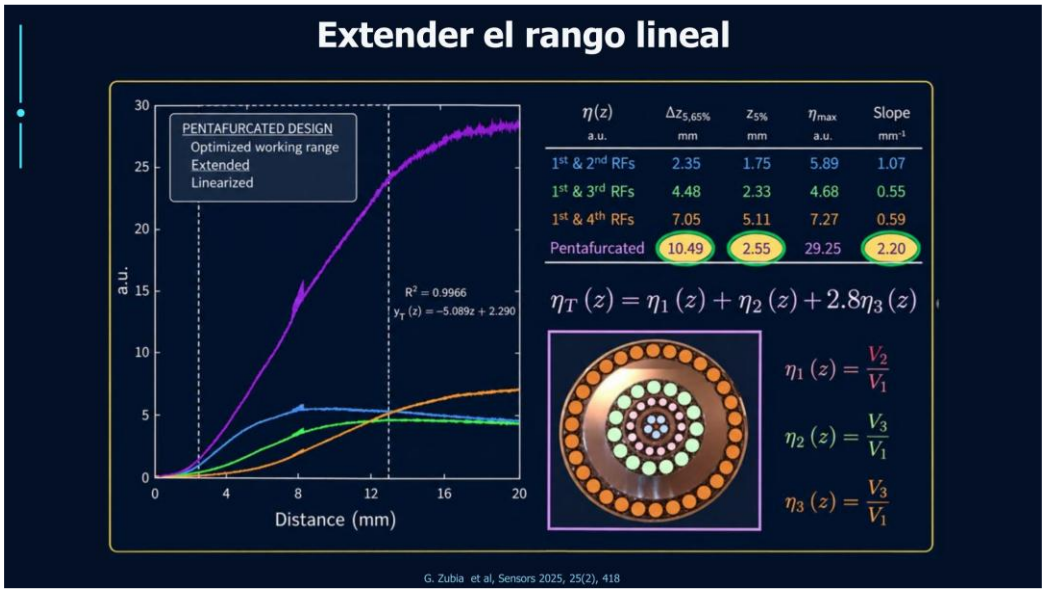


Figura 5. Respuesta de los anillos receptores y combinación utilizada para ampliar y linealizar el rango de un sensor pentafurcado.

En la figura 6 se muestra la respuesta de una primera etapa de 28 álabes. El sensor óptico reprodujo las principales estructuras vibratorias aun trabajando con superficies rugosas y corroídas. En ensayos de BTC en el mismo tipo de motor se trabajó entre 7000 y 15 600 rpm y se alcanzó una precisión del orden de 12 µm en el intervalo de 2 a 4 mm (García et al., 2016).

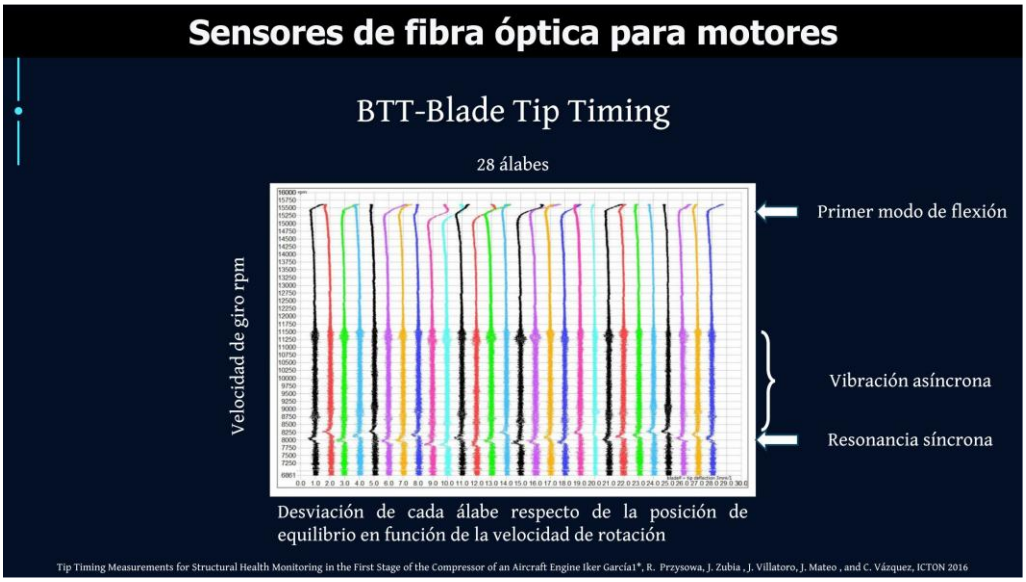


Figura 6. Waterfall BTT de 28 álabes frente a velocidad de giro, con regiones asociadas a respuesta síncrona, vibración asíncrona y aproximación a modos de flexión.

4. Redes de Bragg para monitorización estructural.

Condición de Bragg y sensibilidad a deformación y temperatura.

Una red de Bragg en fibra —Fiber Bragg Grating, FBG— es una modulación periódica del índice de refracción del núcleo. Cada plano dispersa una fracción de la luz y, para una longitud de onda concreta, las contribuciones se suman constructivamente. La longitud de onda reflejada λ_B satisface la condición de Bragg definida en la ecuación (2):

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \qquad (2)$$

donde n_{eff} es el índice efectivo modal y Λ el periodo de la red. Una perturbación pequeña modifica ambos términos, de forma que $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda}$. Bajo deformación axial, la red se alarga —contribución geométrica— y el índice cambia por efecto fotoelástico. El resultado se expresa como $(1 - p_e)\varepsilon$. La temperatura también actúa por dos vías: dilata físicamente el periodo, $\alpha_f \Delta T$, y modifica el índice mediante el coeficiente termoóptico normalizado $\xi = \frac{1}{n_{eff}}\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$. La ecuación lineal de trabajo es definida en la ecuación (3):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T \qquad (3)$$

En una FBG de sílice alrededor de 1550 nm son habituales sensibilidades cercanas a 1,2 pm/με y 10 pm/K. La contribución termo-óptica suele superar a la dilatación de la sílice. Como una sola red entrega únicamente $\Delta\lambda_B$, la deformación y la temperatura no pueden separarse sin información adicional. La práctica habitual es utilizar una FBG de referencia aislada mecánicamente, otro sensor de temperatura o dos elementos con sensibilidades diferentes (García et al., 2015; Zhu et al., 2021).

Interrogación y multiplexación.

Una fuente de banda ancha o un láser barrido ilumina una serie de FBG con longitudes de onda nominales distintas. El espectro reflejado contiene un pico por sensor, por lo que una misma fibra puede formar una red cuasi-distribuida. La densidad de multiplexación depende del ancho espectral de cada red, del rango de deformación y temperatura previsto, de la resolución del interrogador y del margen necesario para evitar solapamientos. Además del seguimiento del centroide, la anchura y la forma del pico aportan información sobre campos no uniformes y transferencia de carga. La posibilidad de embebido resulta atractiva en CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), pero el sensor mide la deformación que realmente se transfiere al núcleo. La geometría de la ranura, la resina, el recubrimiento de la fibra, el adhesivo y la orientación respecto de las capas condicionan la respuesta. Una calibración válida en fibra libre no debe extrapolarse automáticamente a una red integrada.

Medida en vuelo, impactos, hielo y forma.

Las redes de FBG se han empleado para reconstruir la distribución de deformación en alas durante maniobras y para validar modelos estructurales. En una instalación cuasi-distribuida, la respuesta simultánea de redes situadas en el extradós, intradós o largueros permite distinguir flexión, torsión y cargas aerodinámicas. Los datos históricos pueden alimentar criterios de mantenimiento basado en condición y detectar cambios respecto a la firma de referencia (Zhu et al., 2021). Ver figura 7.

Para impactos, una perturbación transitoria se propaga como onda elástica y alcanza las FBG con tiempos y amplitudes diferentes. La localización combina la diferencia temporal, el contenido espectral y la geometría de la red sensora; mapas de deformación permiten comparar eventos de distinta energía (Gomez et al., 2013). En detección de hielo, la masa añadida y el cambio de rigidez modifican la respuesta vibratoria de un modelo de ala, mientras que una fibra serpenteante con múltiples FBG puede cubrir la superficie (Gui et al., 2025). La reconstrucción de forma convierte la

distribución de deformación en curvatura y, mediante integración y condiciones de contorno, estima la deflexión del ala (Ma et al., 2019).

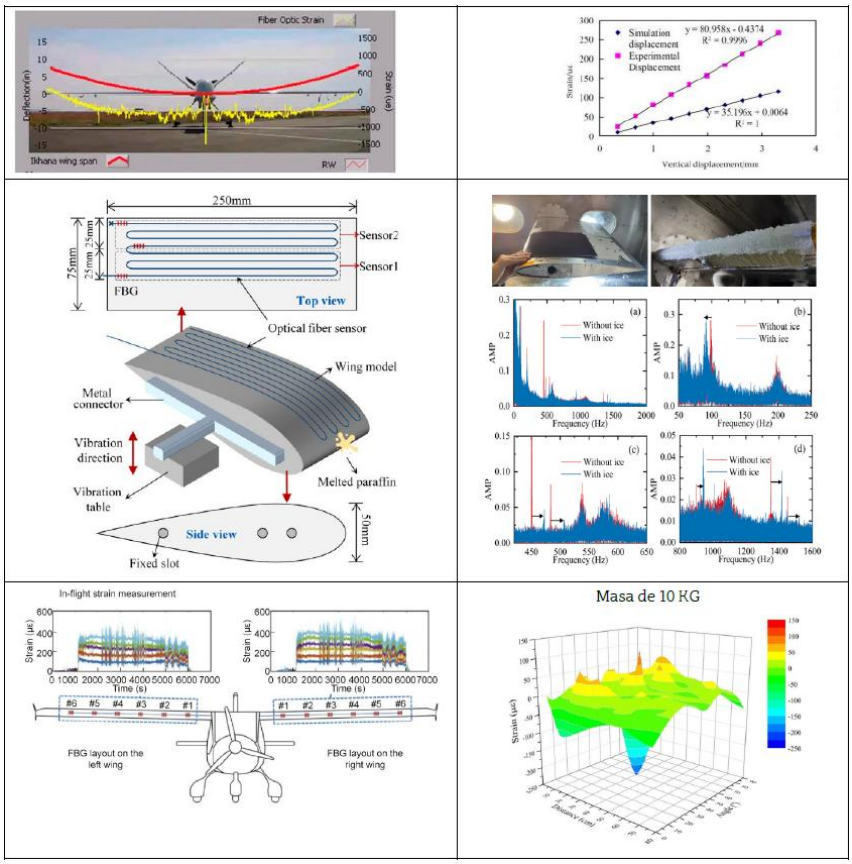


Figura 7. Ejemplos: (a, b) medida de deformación en vuelo; (c, d) detección de hielo; (e) reconstrucción de forma; (f) mapas de impacto.

Arquitecturas complementarias.

Las FBG no agotan las posibilidades del sensado estructural. Un acelerómetro basado en segmentos de fibra multinúcleo asimétrica puede convertir el movimiento en una modulación de interferencia con alta sensibilidad a bajas frecuencias (Amorebieta et al., 2020). Las cavidades Fabry–Perot formadas entre interfaces de fibra permiten medir presión, desplazamiento o temperatura a partir de la fase interferométrica. En aplicaciones de alta temperatura, fibras especiales, cavidades protegidas y técnicas ratiométricas pueden ser preferibles a una FBG convencional. La elección depende del rango térmico, la dinámica, el espacio disponible y la complejidad tolerable del interrogador.

5. Fibras ópticas poliméricas y microestructuradas.

Propiedades relevantes.

La fibra óptica polimérica —FOP, POF en la literatura inglesa— ofrece una respuesta mecánica muy distinta de la sílice. El PMMA tiene menor módulo elástico, mayor deformación admisible, mayor coeficiente de expansión térmica y un diámetro de núcleo que puede acercarse a 1 mm. Ver tabla 1. Estas características facilitan el acoplamiento,

permiten trabajar con curvaturas pequeñas y hacen posible medir grandes deformaciones. Como contrapartida, la atenuación es mayor, el rango térmico es más limitado y la respuesta puede presentar viscoelasticidad, histéresis y dependencia temporal (Kiesel S., 2007, Durana G., 2012).

Tabla 1. Comparación orientativa entre una FOP de PMMA y una fibra de sílice.

Propiedad	**PMMA-FOP**	**Sílice**	**Implicación en sensado**
Densidad	≈1195 kg/m³	≈2200 kg/m³	Menor penalización de masa
Módulo de Young	≈3,2 GPa	≈72 GPa	Mayor deformación para una misma carga
Deformación elástica útil	≈10 %	≈1 %	Apta para grandes deformaciones
Deformación a rotura	≈100 %	≈5–10 %	Alta tolerancia mecánica
Expansión térmica	≈9×10^{-5} K^{-1}	≈$5{,}5\times10^{-7}$ K^{-1}	Mayor sensibilidad y deriva térmica
Coeficiente termoóptico	≈$-1{,}1\times10^{-4}$ K^{-1}	≈$9{,}2\times10^{-6}$ K^{-1}	Signo y magnitud diferentes

Fabricación y microestructuras.

La fabricación comienza con una preforma de polímero que se calienta y estira en una torre de fabricación. Las fibras microestructuradas se obtienen introduciendo canales longitudinales en la preforma, por taladrado o mediante empaquetamiento de capilares. Al escalar la preforma durante el estirado se conserva, dentro de tolerancias, la geometría relativa. Esto permite fabricar núcleos sólidos, suspendidos o huecos y diseñar la distribución modal mediante la microestructura (Arrue et al., 2011; Parola, 2018; Arrospide, 2018). Ver figura 8.

En una fibra de núcleo hueco, una fracción importante del campo puede propagarse por aire. La transmisión deja de depender únicamente del material masivo y pasa a estar controlada por las dimensiones y la disposición de las membranas o canales. Al modificar la escala transversal se desplazan las ventanas espectrales. Esta libertad geométrica amplía el repertorio de transductores, aunque exige controlar colapso de orificios, concentricidad, rugosidad y reproducibilidad.

Medida de grandes deformaciones y monitorización de superficies.

Una FOP puede utilizarse como sensor de elongación mediante modulación de intensidad o fase. En ensayos de deflexión de un flap, la señal de la FOP se comparó con galgas extensométricas y FBG, mostrando que las tecnologías son complementarias: la FOP tolera recorridos y deformaciones grandes; la FBG ofrece una codificación espectral robusta; y la galga proporciona una referencia eléctrica convencional (Gomez et al., 2009; Durana et al., 2009; Zubia et al., 2010). Ver figura 9.

Las redes de periodo largo —Long-Period Gratings, LPG— acoplan el modo del núcleo con modos del revestimiento y producen bandas de pérdidas en transmisión. Una aproximación de la condición resonante es $m\lambda_{res} = \Lambda_{LPG}(n_{co} - n_{cl})$. En una mFOP concreta se midió una sensibilidad de magnitud aproximada de 0,54 pm/με, con signo negativo, frente a valores positivos de 1,48 pm/με para una PMMA-FBG y 1,15 pm/με para una FBG de sílice. Estas cifras dependen del material, la longitud de onda, el modo acoplado y la fabricación, y deben presentarse como resultados de configuraciones específicas (Durana et al., 2012).



Figura 8. Preparación de preformas microestructuradas mediante taladrado o empaquetamiento de capilares (a), preformas (b) y ejemplos de fibras de núcleo hueco con distinta escala (c).

Otra vía consiste en tejer FOP en dos direcciones ortogonales. Matrices de emisores y receptores miden la pérdida o redistribución de potencia causada por un impacto o una deformación local. La arquitectura puede cubrir áreas grandes con componentes de bajo coste, pero requiere compensación frente a curvatura inicial, pérdidas de contacto, temperatura y envejecimiento (Lallana et al., 2021).

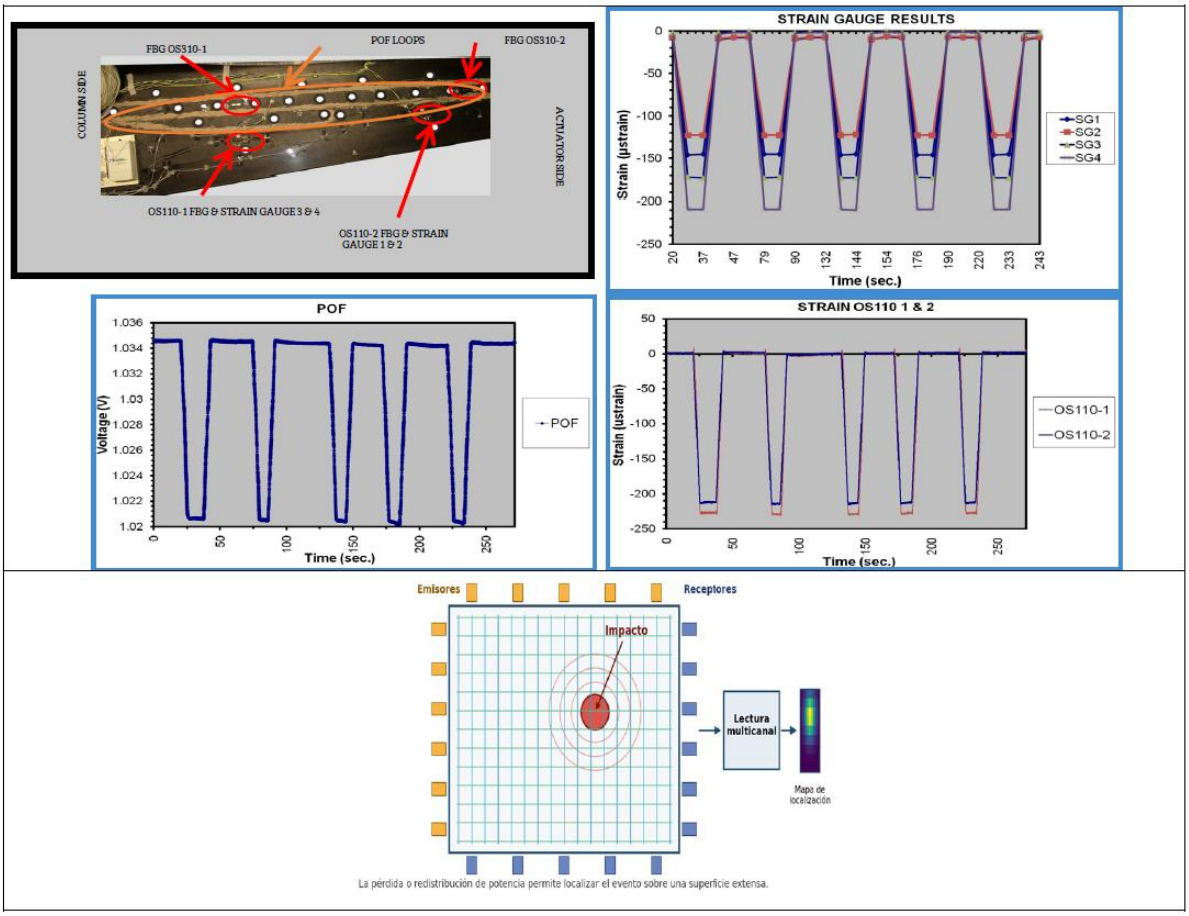


Figura 9. (a) Ensayo de elongación de un flap mediante FOP, FBG y galgas; (b) esquema de una red textil ortogonal de FOP para detectar y localizar impactos.

6. Selección de la tecnología y estrategia de integración.

La comparación de tecnologías debe realizarse a partir de la función de medida y no de una lista genérica de ventajas. Una sonda reflectiva de intensidad es apropiada cuando se necesita una cabeza pasiva, compacta y de respuesta rápida frente a una superficie móvil. Una FBG es preferible cuando se requieren múltiples puntos codificados en longitud de onda y compatibilidad con estructuras compuestas. Una FOP resulta atractiva para deformaciones grandes, superficies extensas o sistemas de bajo coste. Los interferómetros y fibras multinúcleo aportan mayor sensibilidad o nuevas variables, a cambio de una interrogación más exigente. Ver tabla 2.

7. Retos y perspectivas futuras.

El paso de un prototipo a un sistema aeronáutico exige demostrar trazabilidad metrológica, repetibilidad, supervivencia ambiental y compatibilidad con los procesos de certificación. La calibración debe incluir temperatura, vibración, curvatura, envejecimiento, tolerancias de montaje y dispersión entre unidades. En sensores embebidos, la sustitución o reparación puede ser difícil; por ello, la redundancia y la autodiagnosis del enlace son tan importantes como la sensibilidad inicial.

Tabla 2. Criterios de selección para aplicaciones aeronáuticas.

Aplicación	**Magnitud**	**Tecnología**	**Fortaleza principal**	**Limitación dominante**
Motor	BTC	Bundle reflectivo	Alta velocidad y cabeza compacta	Contaminación y reflectividad
Motor	BTT	Sonda óptica + algoritmo	Medida no intrusiva de todos los álabes	Muestreo no uniforme y sincronización
Ala/fuselaje	Deformación y temperatura	FBG multiplexadas	Codificación espectral y embebido	Sensibilidad cruzada y transferencia de carga
Estructura	Impacto/daño	FBG o red FOP	Cobertura espacial y localización	Necesidad de calibración y clasificación
Ala	Hielo y forma	FBG / fibra distribuida	Medida cuasidistribuida	Conversión de señal a variable estructural
Grandes deformaciones	Elongación	FOP / LPG en mFOP	Alta deformabilidad	Viscoelasticidad y temperatura
Vibración baja frecuencia	Aceleración	Fibra multinúcleo	Sensibilidad direccional	Interrogación interferométrica

En motores, la protección de la cabeza óptica frente a suciedad, erosión y temperatura sigue siendo un reto. El diseño de bundles para distintos rangos debe coordinarse con la mecanización de la carcasa, la electrónica de alta velocidad y la identificación de los álabes. En estructuras, la dificultad principal es convertir una variación óptica en una decisión sobre integridad: la señal debe relacionarse con modelos estructurales, límites de alarma y probabilidades de daño, evitando confundir temperatura, carga normal y defecto.

Las líneas de avance más prometedoras son la fotónica integrada para reducir tamaño y coste de los interrogadores, las fibras especiales resistentes a temperaturas extremas, la multiplexación de sensores heterogéneos, los algoritmos de fusión de datos y la monitorización durante todo el ciclo de vida. La inteligencia artificial puede ayudar a clasificar firmas complejas, pero debe apoyarse en modelos físicos, datos representativos y una cuantificación explícita de la incertidumbre. En aeronáutica, una predicción precisa sin trazabilidad, explicabilidad o gestión de fallos no es suficiente.

Conclusiones.

Los sensores de fibra óptica constituyen una familia de tecnologías y no un dispositivo único. En motores, las sondas reflectivas con haces multifurcados permiten medir BTC y BTT con cabezas compactas y resistentes a interferencias electromagnéticas; el diseño geométrico y el procesamiento determinan el rango y la calidad del diagnóstico. En alas y fuselaje, las FBG ofrecen multiplexación y compatibilidad con materiales compuestos, pero su respuesta siempre combina deformación y temperatura si no se incorpora compensación. Las FOP y mFOP amplían el campo hacia grandes deformaciones, superficies extensas y arquitecturas de bajo coste.

Los trabajos resumidos muestran una progresión desde el principio físico hasta la validación en componentes, bancos de ensayo y motores reales. El siguiente paso no consiste únicamente en aumentar la sensibilidad, sino en construir sistemas completos: instalación reproducible, calibración multivariable, autodiagnosis, electrónica robusta,

procesamiento en tiempo real y criterios de mantenimiento. Solo esa integración permitirá que la fibra óptica pase de ser un sensor prometedor a formar parte de la arquitectura certificada de una aeronave.

Créditos y agradecimientos.

Este trabajo se enmarca dentro de los siguientes proyectos: MICIU/AEI PID2024155582OB-C31, PID2024-158310NB-I00 y PDC2025-165025-C21; "ERDF a Way of Making Europe" y "European Union Next GenerationEU/PRTR"; Gobierno Vasco/Eusko Jaurlaritza IT1829-26, ELKARTEK KK 2025/00058, ELKARTEK KK2025/00074; y en parte por la Universidad del País vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea por el proyecto Translight.

Referencias bibliográficas.

Amorebieta, J., Ortega-Gómez, Á., Durana, G., Fernández, R., Antonio-López, J. E., Schülzgen, A., Zubia, J., Amezcua-Correa, R., & Villatoro, J. (2020). *Highly sensitive multicore fiber accelerometer for low frequency vibration sensing*. Scientific Reports, 10, 16180. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73178-x.

Arrospide, E., Durana, G., Azkune, M., Aldabaldetreku, G., Bikandi, I., Ruiz-Rubio, L., & Zubia, J. (2018). *Polymers beyond standard optical fibres—fabrication of microstructured polymer optical fibres*. Polymer International, 67(9), 1155–1163. https://doi.org/10.1002/pi.5602.

Arrue, J., Jiménez, F., Ayesta, I., Illarramendi, M. A., & Zubia, J. (2011). *Polymer-optical-fiber lasers and amplifiers doped with organic dyes*. Polymers, 3(3), 1162–1180. https://doi.org/10.3390/polym3031162.

Durana, G., Gómez, J., Aldabaldetreku, G., Zubia, J., Montero, A., & Sáez de Ocáriz, I. (2012). *Assessment of an LPG mPOF for strain sensing.* IEEE Sensors Journal, 12(8), 2668–2673. https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2199105.

Durana, G., Kirchhof, M., Luber, M., Sáez de Ocáriz, I., Poisel, H., Zubia, J., & Vázquez, C. (2009). *Use of a novel fiber optical strain sensor for monitoring the vertical deflection of an aircraft flap.* IEEE Sensors Journal, 9(10), 1219–1225. https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2029109.

García, I., Beloki, J., Zubia, J., Arrue, J., Durana, G., & Aldabaldetreku, G. (2013). *Turbine-blade tip clearance and tip timing measurements using an optical fiber bundle sensor.* Proceedings of SPIE, 8788, 87883H. https://doi.org/10.1117/12.2020540.

García, I., Beloki, J., Zubia, J., Aldabaldetreku, G., Illarramendi, M. A., & Jiménez, F. (2013). *An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig.* Sensors, 13(6), 7385–7398. https://doi.org/10.3390/s130607385.

García, I., Przysowa, R., Amorebieta, J., & Zubia, J. (2016). *Tip-clearance measurement in the first stage of the compressor of an aircraft engine*. Sensors, 16(11), 1897. https://doi.org/10.3390/s16111897.

García, I., Przysowa, R., Zubia, J., Villatoro, J., Mateo, J., & Vázquez, C. (2016). *Tip timing measurements for structural health monitoring in the first stage of the compressor of an aircraft engine.* 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 1–4. https://doi.org/10.1109/ICTON.2016.7550337.

García, I., Zubia, J., Berganza, A., Beloki, J., Arrue, J., Illarramendi, M. A., Mateo, J., & Vázquez, C. (2015). *Different configurations of a reflective intensity-modulated optical sensor to avoid modal noise in tip-clearance measurements.* Journal of Lightwave Technology, 33(12), 2663–2669. https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2397473.

García, I., Zubia, J., Durana, G., Aldabaldetreku, G., Illarramendi, M. A., & Villatoro, J. (2015). *Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring.* Sensors, 15(7), 15494–15519. https://doi.org/10.3390/s150715494.

Gómez, J., Jorge, I., Durana, G., Arrue, J., Zubia, J., Aranguren, G., Montero, A., & López, I. (2013). *Proof of concept of impact detection in composites using fiber Bragg grating arrays*. Sensors, 13(9), 11998–12011. https://doi.org/10.3390/s130911998.

Gómez, J., Zubia, J., Aranguren, G., Arrue, J., Poisel, H., & Sáez, I. (2009). *Comparing polymer optical fiber, fiber Bragg grating, and traditional strain gauge for aircraft structural health monitoring.* Applied Optics, 48(8), 1436–1443. https://doi.org/10.1364/AO.48.001436.

Gui, X., Zeng, F., Gao, J., Fu, X., & Li, Z. (2025). *Detection of aircraft wing icing and de-icing by optical fiber sensing with FBG array.* Measurement, 247, 116748. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.116748.

Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). *Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication.* Applied Physics Letters, 32(10), 647–649. https://doi.org/10.1063/1.89881.

Kao, C. K., & Hockham, G. A. (1966). *Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies.* Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 113(7), 1151–1158. https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189.

Kiesel, S., Peters, K., Hassan, T., & Kowalsky, M. (2007). *Behavior of intrinsic polymer optical fiber sensor for large-strain applications.* Measurement Science and Technology, 18(10), 3144–3154. https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/10/S16.

Lallana, P. C., Aldabaldetreku, G., López, A., Montero, D. S., Durana, G., Mateo, J., Losada, M. A., Zubia, J., & Vázquez, C. (2021). *Sensing applications in aircrafts using polymer optical fibres*. Sensors, 21(11), 3605. https://doi.org/10.3390/s21113605.

Ma, Z., & Chen, X. (2019). *Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: Recent applications and technical analysis*. Sensors, 19(1), 55. https://doi.org/10.3390/s19010055.

Parola, I., Zaremba, D., Evert, R., Kielhorn, J., Jakobs, F., Illarramendi, M. A., Zubia, J., Kowalsky, W., & Johannes, H.-H. (2018). *High performance fluorescent fiber solar concentrators employing double-doped polymer optical fibers.* Solar Energy Materials and Solar Cells, 178, 20–28. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.01.013.

Zhu, L., Sun, G., Bao, W., You, Z., Meng, F., & Dong, M. (2022). *Structural deformation monitoring of flight vehicles based on optical fiber sensing technology: A review and future perspectives.* Engineering, 16, 39–55. https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.02.022.

Zubia, G., Zubia, J., Amorebieta, J., Aldabaldetreku, G., Zubia, A., & Durana, G. (2025). *High-performance optical fiber displacement sensor with extended linear range and sensitivity.* Sensors, 25(2), 418. https://doi.org/10.3390/s25020418.

Zubia, J., Gómez, J., Durana, G., Aranguren, G., Sáez, I., López, I., Poisel, H., & Luber, M. (2010). *Comparing polymer optical fiber, fiber Bragg gratings and traditional strain gauges for aircraft structural health monitoring.* SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, California, March 7–12, 2010.

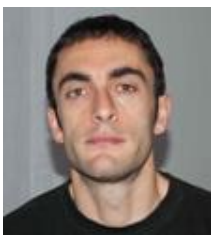
Información de los autores.



Joseba Zubia Zaballa es Investigador de la Universidad del País Vasco, Bilbao, España. es autor de 120 publicaciones en revistas indexadas (18 invitadas y una en Scientific reports en 2017), la mayoría en el primer cuartil; 200 comunicaciones a congresos internacionales, 42 son invitadas y 34 nacionales, y 4 patentes. Ha participado en: 67 proyectos de investigación competitivos nacionales y europeos (Investigador Principal (IP) de 43 de ellos); en 21 contratos de Investigación y Desarrollo (I+D) con empresas (IP en 16); Estancias, predoctoral en Göteborg (Chalmers Institute of Technology) y postdoctorales Nürenberg (Plastic Optical Fibres: Applications and Components, POFAC, Alemania). Evaluador de 23 revistas de su especialidad indexadas en el JCR. Miembro de los comités científicos de 2 congresos internacionales y 1 nacional. Ha organizado dos congresos internacionales (Plastic Optical Fiber, POF2011 y European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM2016) y uno nacional (OPTOEL2007). Premio de Investigación de la Fundación Euskoiker 2010 en el área de Tecnología e Ingeniería y Premio Extraordinario de Doctorado (1993). Becario predoctoral y es doctor en Ciencias Físicas por la UPV-EHU. El Dr. ha impartido más de 20 asignaturas en todos los ciclos. Ha impartido clases en 6 másteres y programas de doctorado con mención de calidad y actualmente imparte clases de metodología de la investigación y Fotónica industrial, Interferometría Óptica y en un grado sobre Mecatrónica (sensores ópticos) en la Universidad Georg Ohm de Nurenberg. Ha dirigido 10 tesis doctorales, cinco de ellas internacionales. Ha dirigido más de 72 Proyecto de Fon de carrera PFC y Trabajos de Fin de Grado.



Gotzon Aldabaldetreku es Ingeniero de Telecomunicación (2000) por la UPV/EHU, con varios premios al mejor expediente y número 1 de la 10ª promoción, y doctorado (2006) en Ingeniería de Telecomunicación con mención “Doctor Europeus” y Premio Extraordinario, donde ejerce de profesor desde 2002 y es actualmente Profesor Titular de Universidad (acreditado para Catedrático de Universidad en 2024). Forma parte del grupo de investigación Applied Photonics Group. Ha codirigido 3 tesis doctorales (una con mención internacional). Ha realizado 2 estancias en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Núremberg (Alemania). Ha dirigido 5 proyectos de investigación como investigador principal y ha participado en más de 50 proyectos de investigación y en otros 4 contratos de investigación con empresas. Además, ha sido autor de más de 40 artículos científicos en revistas indexadas en el SCI y recogidas en el JCR, ha presentado más de 80 contribuciones en congresos, ha publicado 4 libros docentes y ha colaborado en 3 capítulos de libros de carácter internacional. Cuenta con 4 Sexenios de Investigación reconocidos por la CNEAI. Ha ejercido como evaluador de más de 40 artículos para revistas indexadas de reconocido prestigio. Ha sido secretario y vicepresidente de los comités organizadores de la 5ª Reunión Española de Optoelectrónica (2007) y del 20th International Conference on POFs (2011), respectivamente. Actualmente trabaja en el estudio de sensores basados en fibras ópticas.



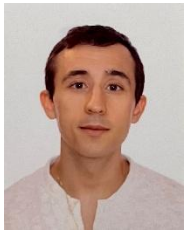
Gaizka Durana obtuvo su título de grado en Física del Estado Sólido en 1999 y su doctorado en Ingeniería en 2008, ambos por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en Bilbao, España. Su tesis doctoral, que recibió la mención de «Doctorado Europeo», se centró en el análisis experimental y numérico de aspectos fundamentales de la propagación de la luz en fibras ópticas multimodo. Actualmente, es profesor agregado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Sus intereses de investigación actuales incluyen la fabricación de fibras ópticas poliméricas especiales, así como el diseño, desarrollo y aplicación de sensores ópticos basados en fibra.



Oskar Arrizabalaga es Ingeniero de Telecomunicación, con un Máster en Ingeniería Física y Doctor en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones para Redes Móviles por la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), con Mención Internacional. Actualmente es Profesor del Departamento de Matemática Aplicada en la UPV/EHU y miembro activo del Applied Photonics Group (APG). Su actividad investigadora se centra en el diseño y desarrollo de sensores fotónicos avanzados basados en fibra óptica, con especial énfasis en estructuras interferométricas y cavidades ópticas asimétricas. Estas tecnologías se orientan a aplicaciones de biosensado, monitorización no invasiva de parámetros biológicos y sensado avanzado para la industria aeronáutica, incluyendo la monitorización estructural. Su investigación integra además técnicas de inteligencia artificial para el procesado de señal y la mejora de la sensibilidad y robustez de los sensores.Ha participado y liderado proyectos competitivos a nivel regional y nacional y es autor de numerosos artículos científicos en revistas internacionales de alto impacto (Q1), contribuyendo de forma habitual en congresos internacionales del ámbito de la fotónica, los sensores ópticos y las tecnologías cuánticas aplicadas.



Josu Amorebieta obtuvo los títulos de máster y doctorado en Ingeniería de Telecomunicaciones por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en Bilbao, España, en 2016 y 2021, respectivamente. Posteriormente, continuó su trayectoria investigadora en el Grupo de Fotónica Aplicada de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en Bilbao, donde actualmente ejerce como profesor en el Departamento de Matemáticas Aplicadas de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Sus líneas de investigación abarcan el modelado matemático, el diseño, la fabricación y la validación de sensores fotónicos para diversas aplicaciones industriales, como las del sector aeronáutico.



Gorka Zubia nació en Barakaldo (España) en 1996. Obtuvo los títulos de Grado y Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) en 2021. Fue beneficiario de la beca de colaboración en investigación Ikasiker, otorgada por el Gobierno Vasco. Actualmente cursa el doctorado en Fotónica en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Recibió una beca predoctoral del Gobierno Vasco para desarrollar su investigación doctoral en el Grupo de Fotónica Aplicada (APG) de la UPV/EHU. Sus intereses de investigación se centran en dispositivos fotónicos para la monitorización de la integridad estructural y las comunicaciones. Gorka realizó una estancia de investigación predoctoral en CREOL (The College of Optics and Photonics) de

la Universidad de Florida Central (UCF). Ha sido miembro activo del grupo de investigación de Fibras y Dispositivos Microestructurados (MOF), dirigido por el profesor Rodrigo Amezcu. Durante su estancia, se centró en la caracterización de fibras de núcleo hueco para la transmisión de datos en la banda C (banda de telecomunicaciones). Desde 2023, Gorka es profesor ayudante en el Departamento de Ingeniería Gráfica y Proyectos de Ingeniería de la UPV/EHU. Ha impartido docencia en la UPV/EHU en las siguientes materias: Campos Electromagnéticos, Sistemas de Alta Frecuencia, Comunicaciones Ópticas, Cálculo, Álgebra Lineal, Control de Sistemas del Vehículo y Sistemas de Asistencia a la Conducción, Automatismos y Control, Sistemas Controlados por Ordenador, Informática Industrial, Gestión de Proyectos, Proyectos de Ingeniería y Dibujo de Ingeniería.

Sensores de fibra óptica que aprovechan las limitaciones de las telecomunicaciones para crear herramientas de medición.

Fiber optic sensors that take advantage of the limitations of telecommunications to create measurement tools.

Luis Enrique Guillen Ruiz (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
D10270777@tuxtla.tecnm.mx.

Jorge Luis Camas Anzueto* (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Joel Gómez Pérez (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, joel.gp@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Grajales Coutiño (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Madaín Pérez Patricio (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
madain.pp@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en agosto 20, 2026; aceptado en octubre 08, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Cuarto Encuentro de Investigación de Estudiantes en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica 2026.

Resumen.

Este artículo muestra la evolución de la fibra óptica desde su función tradicional en las telecomunicaciones hasta su uso como tecnología de sensado. Se explican los fundamentos de la fibra óptica, su estructura, su principio de funcionamiento y sus aplicaciones en la transmisión de información, destacando fenómenos como la atenuación y las pérdidas por curvatura, que suelen constituir limitaciones en los sistemas de comunicación. Posteriormente, se muestra cómo estos efectos pueden aprovecharse para desarrollar sensores basados en variaciones de intensidad, fase, longitud de onda y polarización de la luz. Finalmente, se presentan diversos sensores desarrollados para medir variables físicas, lo que demuestra que fenómenos considerados perjudiciales en telecomunicaciones pueden transformarse en herramientas de alta sensibilidad para aplicaciones de monitoreo de la salud estructural, industrial y de ingeniería.

Palabras clave: Atenuación, fibra óptica, monitoreo estructural, sensores ópticos, telecomunicaciones.

Abstract.

This article traces the evolution of optical fiber from its traditional role in telecommunications to its use as a sensing technology. It explains the fundamentals of optical fiber, its structure, operating principle, and applications in information transmission, highlighting phenomena such as attenuation and bending losses, which typically represent

limitations in communication systems. Subsequently, it demonstrates how these effects can be harnessed to develop sensors based on variations in light intensity, phase, wavelength, and polarization. Finally, it presents various sensors developed to measure physical variables, demonstrating that phenomena considered detrimental in telecommunications can be transformed into highly sensitive tools for structural health monitoring, industrial, and engineering applications.

Keywords: Attenuation, fiber optics, optical sensors, structural monitoring, telecommunications.

1. Descripción de la conferencia.

La fibra óptica es una de las tecnologías más importantes desarrolladas para las telecomunicaciones modernas, ya que permite transmitir grandes cantidades de información a largas distancias con bajas pérdidas y alta inmunidad frente al ruido electromagnético. Millones de kilómetros de fibra óptica conectan continentes, ciudades y hogares, lo que permite el funcionamiento de internet y de múltiples sistemas de comunicación, como se muestra en la figura 1. Su operación se basa en la reflexión total interna de la luz dentro de un núcleo de vidrio o plástico rodeado por un revestimiento de menor índice de refracción.

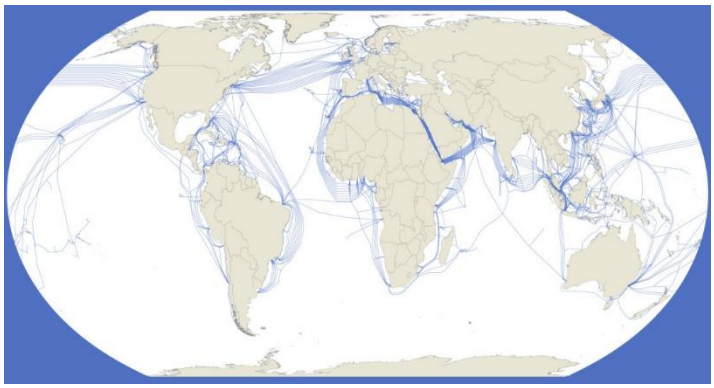


Figura 1. Distribución de fibras ópticas a nivel mundial (Fundación Telefónica, 2021).

En los sistemas de telecomunicaciones se identifican diversos fenómenos que afectan la calidad de la transmisión de la señal óptica, tales como la atenuación, las pérdidas por curvatura, la dispersión o el acoplamiento modal. Estos efectos se han considerado limitaciones que deben minimizarse para garantizar una transmisión eficiente de la información. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que dichos fenómenos pueden aprovecharse para desarrollar dispositivos capaces de medir cambios físicos del entorno con alta sensibilidad.

Los sensores de fibra óptica surgen precisamente de esta idea: aprovechar las variaciones que experimenta la luz al interactuar con el medio ambiente para obtener información sobre parámetros físicos, químicos o biológicos. Dependiendo de la técnica empleada, es posible detectar desplazamientos, deformaciones, temperatura, presión, vibraciones, índice de refracción y otras magnitudes de interés en aplicaciones industriales, médicas, ambientales y de monitoreo estructural.

En esta conferencia se presentan los fundamentos de la fibra óptica y su evolución, desde las telecomunicaciones hasta el campo del sensado óptico. Asimismo, se analizan los principales mecanismos de interrogación basados en la intensidad, la fase, la longitud de onda y la polarización, destacando cómo fenómenos considerados perjudiciales para la transmisión de información pueden convertirse en herramientas de medición de alta precisión.

Finalmente, se muestran diversos sensores desarrollados con estructuras de fibra óptica que aprovechan las pérdidas por curvatura, las interferencias ópticas y el acoplamiento modal para la detección de variables físicas. Estos desarrollos demuestran que las limitaciones inherentes a los sistemas de telecomunicaciones pueden transformarse en

ventajas para la creación de sensores avanzados, lo que contribuye al desarrollo de tecnologías de monitoreo más sensibles, compactas y versátiles para aplicaciones de ingeniería y de monitoreo estructural.

2. Fundamentos de la fibra óptica.

La fibra óptica está compuesta por un núcleo, un revestimiento y un recubrimiento, como se muestra en la figura 2a, y generalmente se clasifica en fibras monomodo con un núcleo de 9 µm de diámetro y fibras multimodo con un núcleo de 50 o 62.5 µm de diámetro, como se observa en la figura 2b.

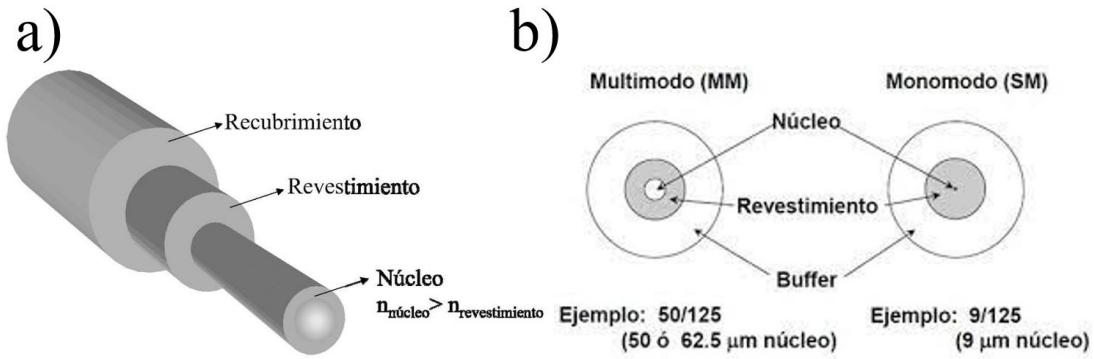


Figura 2. Estructura y clasificación de las fibras ópticas: a) Componentes principales de una fibra óptica; b) Comparación entre fibras multimodo y monomodo según el diámetro de su núcleo (Hernández-García et al., 2010).

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de reflexión total interna (ley de Snell), mediante el cual la luz puede propagarse a través de un núcleo de vidrio o plástico, rodeado por un revestimiento con un índice de refracción inferior.

La reflexión total interna es el principio que rige la propagación de la luz a través de una fibra óptica. La ley de Snell describe el comportamiento de la luz en la interfaz entre dos medios con diferente índice de refracción y se expresa en la ecuación (1) (Chomycz, 1998):

$$n_1 sen\theta_i = n_2 sen\theta_r \qquad (1)$$

donde $\boldsymbol{n_1}$ y $\boldsymbol{n_2}$ representan los índices de refracción de la fibra del núcleo y del revestimiento, respectivamente, mientras que $\boldsymbol{\theta_i}$ y $\boldsymbol{\theta_r}$ corresponden a los ángulos de incidencia y refracción. Para que ocurra reflexión total interna, el ángulo de incidencia crítico debe ser mayor que el ángulo crítico $\boldsymbol{\theta c}$, es decir, $\boldsymbol{\theta_i} > \boldsymbol{\theta c}$. El ángulo crítico se obtiene aplicando la ley de Snell cuando el ángulo de refracción es de $\boldsymbol{\theta_r} = 90°$, correspondiente al límite entre refracción y reflexión total interna como se muestra en la ecuación (2) (Chomycz, 1998):

$$sen\theta_i = \frac{n_2}{n_1} sen(90) \therefore sen^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \theta_i = \theta_c \qquad (2)$$

donde $n_1 > n_2$ se considera una condición indispensable para guiar la luz, como se observa en la figura 3.

Otro de los elementos indispensables es la fuente de luz utilizada para transmitir la información. La luz empleada en las fibras ópticas corresponde a una pequeña región del espectro electromagnético y, según la aplicación, se seleccionan longitudes de onda específicas para optimizar la transmisión, como se observa en la figura 4. En telecomunicaciones se utilizan principalmente las regiones del espectro cercano al infrarrojo, ya que ofrecen mejores condiciones de propagación en la fibra.

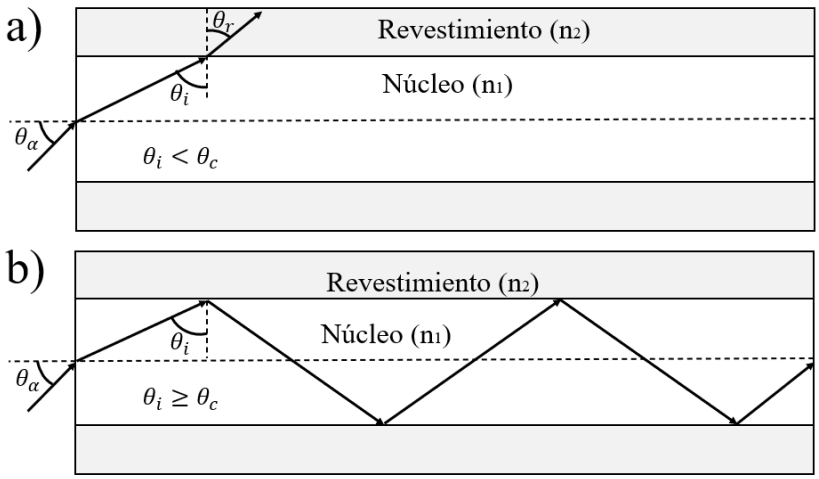


Figura 3. Propagación de la luz en una fibra óptica para: a) $\boldsymbol{\theta_i < \theta c}$, donde ocurre refracción; y b) $\boldsymbol{\theta_i \geq \theta c}$, donde ocurre reflexión total interna.

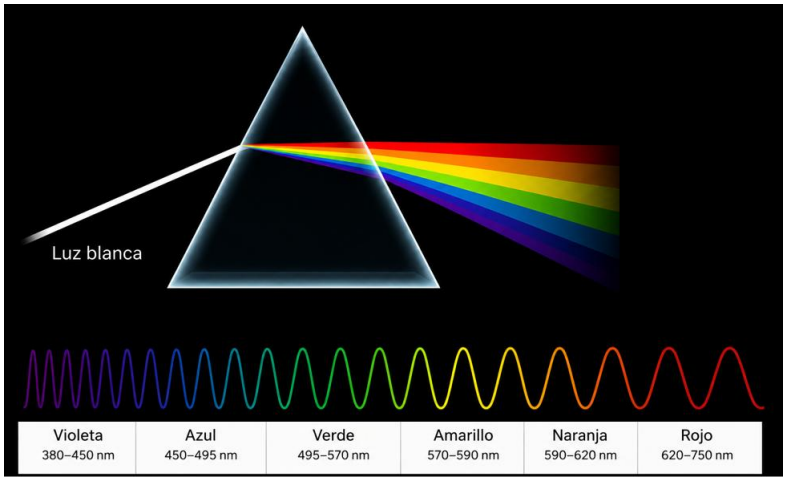


Figura 4. Espectro visible obtenido a partir de la dispersión de la luz blanca y que representa sus diferentes longitudes de onda.

Las fibras ópticas operan principalmente en tres ventanas de transmisión ubicadas alrededor de 850 nm, 1300 nm y 1550 nm, seleccionadas por presentar bajas pérdidas y dispersión, como se observa en la figura 5a. Entre ellas, la ventana de 1550 nm es la más utilizada en telecomunicaciones por su atenuación mínima, lo que permite alcanzar mayores distancias de transmisión. Estas ventanas también son fundamentales en el desarrollo de sensores de fibra óptica, ya que las características de propagación de la luz dependen tanto de la longitud de onda empleada como del tipo de fibra utilizada, como se muestra en la figura 5b.

Para generar y detectar la señal óptica se emplea un sistema compuesto por una fuente de luz, una fibra óptica y un fotodetector. Como se muestra en la figura 6, las fuentes de luz LED producen un haz divergente y de mayor ancho espectral, lo que facilita el acoplamiento a la fibra, mientras que los láseres generan un haz más colimado y de menor ancho espectral, lo que reduce la dispersión y permite mayores distancias de transmisión. Estas características hacen que los LED sean adecuados para enlaces de corto alcance, mientras que los láseres se prefieren en sistemas de alta velocidad y larga distancia.

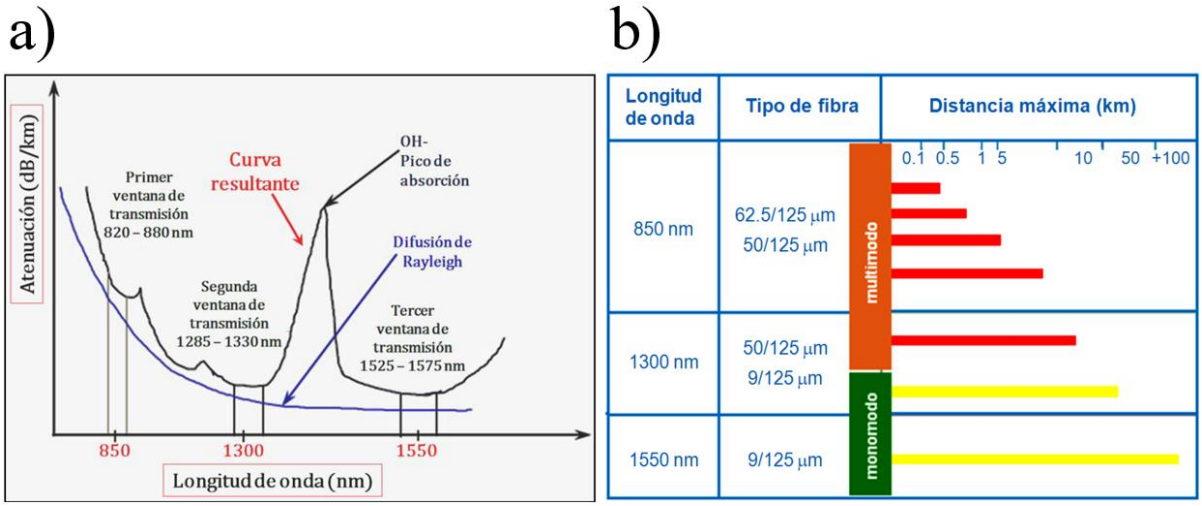


Figura 5. Ventanas de operación de las fibras ópticas en telecomunicaciones: a) atenuación en función de la longitud de onda; b) distancias máximas de transmisión para diferentes tipos de fibra (Coimbra G., 2011).

En ambos casos, la señal óptica vuelve a convertirse en una señal eléctrica mediante un fotodetector, lo que completa el proceso de comunicación. Estas diferencias explican por qué los LED suelen emplearse en aplicaciones de corto alcance y menor costo, mientras que los láseres dominan en las redes modernas de telecomunicaciones, donde se requiere transmitir grandes cantidades de información a largas distancias.



Figura 6. Diferencias entre las tecnologías LED y láser utilizadas en comunicaciones por fibra óptica, mostrando sus fuentes de luz, su propagación en la fibra y su detección óptica.

2. Fibras ópticas en las telecomunicaciones.

La fibra óptica ha revolucionado sectores como el entretenimiento, la medicina, las aplicaciones militares y las telecomunicaciones. Su capacidad para transmitir grandes volúmenes de información a alta velocidad y con alta confiabilidad permite desde servicios de streaming y videojuegos en línea hasta sistemas médicos avanzados, comunicaciones seguras y la infraestructura que sustenta internet a nivel mundial, como se observa en la figura 7.

Estas aplicaciones evidencian cómo la fibra óptica se ha convertido en una tecnología esencial para el desarrollo de la sociedad moderna debido a su elevada capacidad de transmisión, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y posibilidad de operar a largas distancias; por ello, se ha convertido en la base de las comunicaciones modernas y en uno de los pilares de la conectividad global.



Figura 7. Aplicaciones de la fibra óptica en telecomunicaciones, medicina, defensa e internet, destacando su importancia para la transmisión rápida y confiable de información.

La forma ideal de transmitir información a través de una fibra óptica es mantenerla en posición recta, ya que, si se dobla, se altera la reflexión total interna y se produce una pérdida de potencia, lo cual se considera uno de los fenómenos más indeseables en las telecomunicaciones. Cuando la fibra presenta radios de curvatura suficientemente grandes, la luz continúa propagándose por reflexión total interna y las pérdidas son prácticamente despreciables. Sin embargo, al reducirse el radio de curvatura, parte de la energía óptica deja de cumplir la condición de reflexión total y se dispersa hacia el revestimiento y el exterior. Como consecuencia, la potencia transmitida disminuye y la calidad de la comunicación puede verse afectada, como se observa en la figura 8.

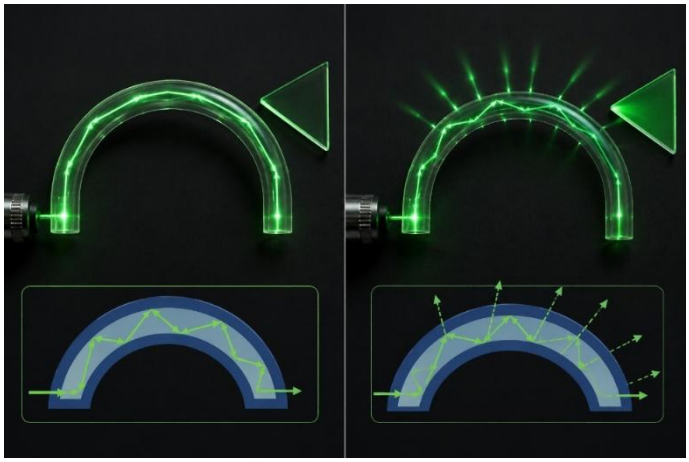


Figura 8. Influencia del radio de curvatura en el confinamiento de la luz dentro de una fibra óptica y en la generación de pérdidas por curvatura.

La figura 9 muestra algunos de los principales mecanismos responsables de la atenuación en los enlaces de fibra óptica. Las pérdidas pueden originarse por factores como una separación longitudinal entre fibras, en la que la expansión natural del haz reduce el acoplamiento de potencia; por desalineaciones transversales, que impiden la coincidencia adecuada entre los núcleos; y por desalineaciones angulares, que modifican la dirección de propagación de la luz al pasar de una fibra a otra (figuras 9a a 9c).

Otro factor importante que atenúa la potencia óptica son las imperfecciones geométricas del núcleo, representadas por desalineaciones excéntricas o elípticas, que provocan una disminución adicional de la eficiencia de acoplamiento (figura 9d). Finalmente, la microcurvatura genera pequeñas deformaciones a lo largo de la fibra que alteran las condiciones de reflexión total interna y permiten que parte de la energía óptica escape del núcleo (figura 9e).

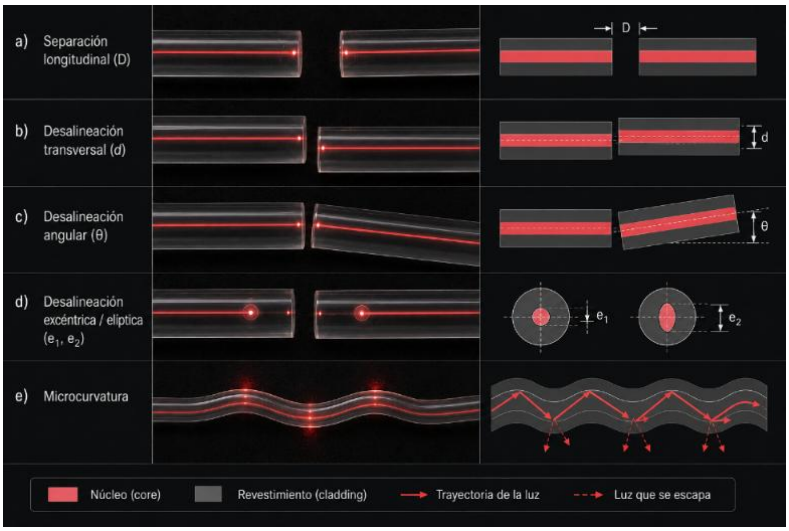


Figura 9. Representación de los principales mecanismos de pérdida en enlaces de fibra óptica: a) separación longitudinal, b) desalineación transversal, c) desalineación angular, d) excentricidad/elipticidad del núcleo y e) microcurvatura, junto con sus efectos sobre la trayectoria de propagación de la luz.

Para monitorear estos elementos se utiliza un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), como se muestra en la figura 10. El OTDR evalúa los enlaces de fibra óptica mediante el análisis de la luz reflejada y retrodispersada. La traza obtenida permite identificar eventos como empalmes, conectores, curvaturas y terminaciones de la fibra, así como determinar las pérdidas asociadas y su ubicación. La disminución progresiva de la señal refleja la atenuación propia de la fibra, mientras que los picos corresponden a reflexiones generadas por discontinuidades o cambios en el enlace, lo que convierte al OTDR en una herramienta esencial para el diagnóstico y el mantenimiento de redes ópticas.

Aunque este efecto representa una limitación para los sistemas de telecomunicaciones, también constituye la base de numerosos sensores de fibra óptica, ya que la cantidad de luz perdida depende directamente de la deformación, el desplazamiento o la curvatura aplicados a la fibra. De esta manera, un fenómeno considerado indeseable en la transmisión de información puede convertirse en un mecanismo útil para medir variables físicas.

3. Fibra óptica en sensores.

Para diseñar un sensor de fibra óptica se utiliza la ecuación (3) (Hecht, 2017):

$$E(z,t) = E_0 \cos(\omega t - \beta z + \phi) \qquad (3)$$

donde E_0 es la amplitud de la onda, βes la constante de propagación, ω es la frecuencia angular, ϕ es la fase inicial. El principio de funcionamiento de los sensores de fibra óptica consiste en permitir que una perturbación externa, como la temperatura, la presión, la deformación o el desplazamiento, modifique alguna propiedad de la señal óptica durante su propagación. Dependiendo del parámetro afectado, se emplean distintos mecanismos de interrogación. La figura 11

muestra las principales técnicas empleadas en el sensado óptico: sensores de intensidad, basados en variaciones de potencia óptica; sensores interferométricos, que detectan cambios de fase; sensores espectrales, basados en desplazamientos de longitud de onda; y sensores polarimétricos, que analizan modificaciones en el estado de polarización. De esta manera, las perturbaciones físicas pueden convertirse en variaciones medibles de la señal óptica.

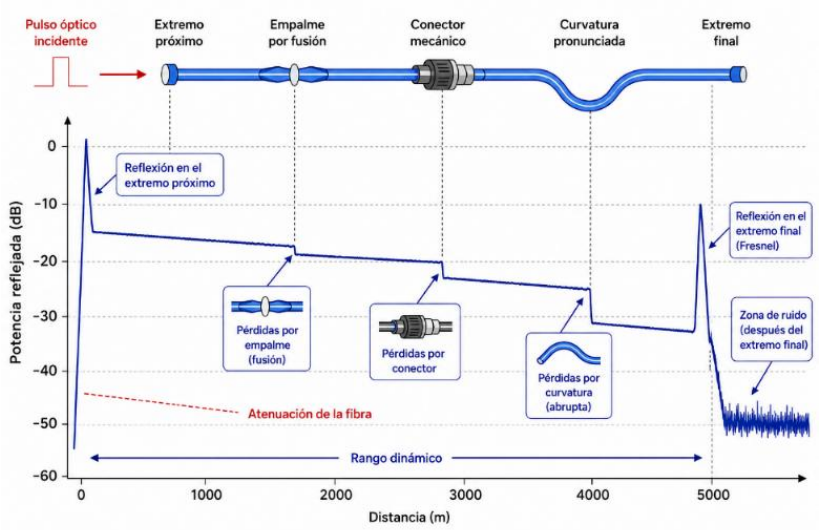


Figura 10. Traza OTDR utilizada para localizar empalmes, conectores, curvaturas y terminaciones mediante las variaciones de potencia y las reflexiones registradas a lo largo de la fibra óptica.

A continuación, se muestran algunos trabajos que ejemplifican el uso de sensores para el monitoreo de varios parámetros. La figura 12 presenta cuatro ejemplos representativos de aplicaciones de sensado óptico basadas en fibra óptica. En (a), Pérez Toalá et al. (2025) desarrollaron un sistema para medir vibraciones mediante una estructura multimodo sensible a perturbaciones mecánicas. En (b), Velasco-Bolom et al. (2025) emplearon una configuración óptica para la detección de iones de hidrógeno (pH) mediante cambios en la respuesta espectral de un material sensible depositado sobre una fibra óptica. En (c), Morales-Navarro et al. (2024) implementaron un sistema optomecatrónico para cuantificar la rotación del plano de polarización de la luz en materiales cromoactivos sometidos a control de temperatura. Finalmente, en (d), Guillén-Ruiz et al. (2023) demostraron un sensor de desplazamiento basado en el efecto Vernier armónico utilizando interferómetros de fibra óptica en cascada, logrando una mejora significativa en la sensibilidad de medición.

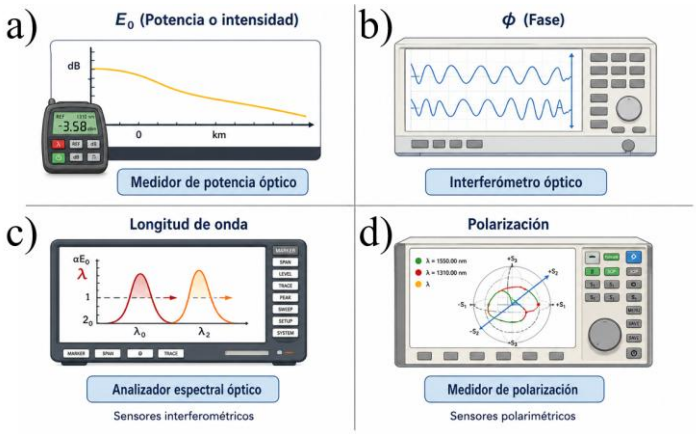


Figura 11. Principales técnicas de interrogación de sensores de fibra óptica basadas en cambios de a) intensidad, b) fase, c) longitud de onda y d) polarización de la señal óptica.

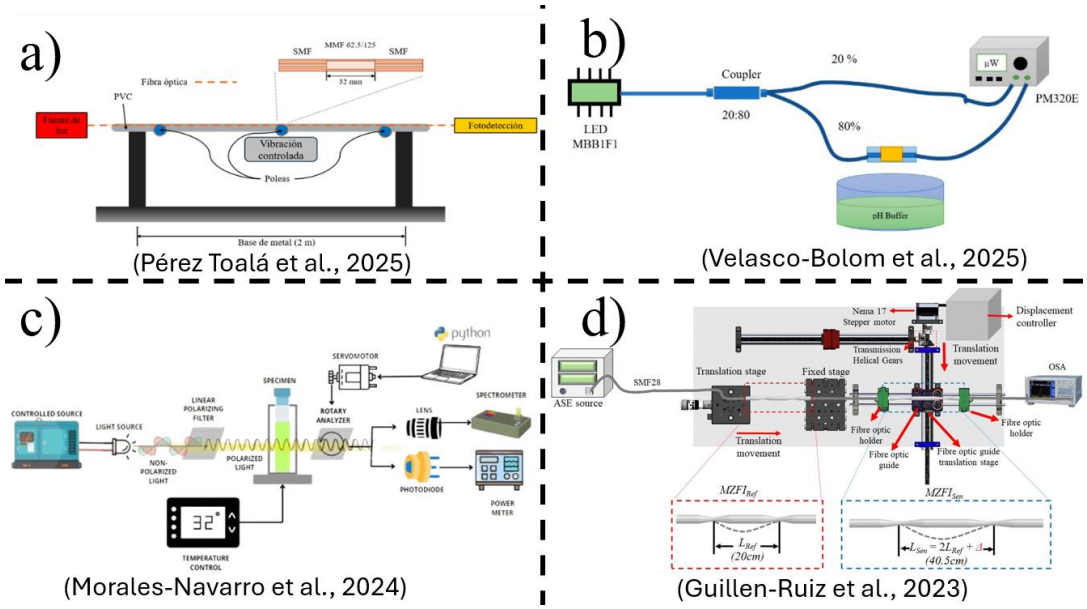


Figura 12. Aplicaciones de sensores de fibra óptica para la medición de vibraciones, pH, polarización y desplazamiento. Adaptado de Pérez Toalá et al. (2025), Velasco-Bolom et al. (2025), Morales-Navarro et al. (2024) y Guillen-Ruiz et al. (2023).

La figura 13 presenta otras aplicaciones de sensores de fibra óptica orientadas al monitoreo de variables físicas y químicas. En (a), Pérez-García et al. (2025) emplean una fibra sin núcleo recubierta con una capa sensible de lofina para medir la temperatura mediante variaciones en la intensidad óptica transmitida. En (b), Guillén-Ruiz et al. (2024) desarrollan un sensor de desplazamiento basado en el efecto Vernier óptico mediante interferómetros de fibra óptica en cascada, lo que incrementa significativamente la sensibilidad del sistema. En (c), Guillén-Ruiz et al. (2024) presentan un sensor de desplazamiento de gran rango basado en estructuras multimodo y en un transductor toroidal, en el que las pérdidas por curvatura se emplean como mecanismo de detección. Finalmente, en (d), Camas-Anzueto et al. (2014) proponen un sensor químico para la detección de nitratos mediante una capa sensible depositada sobre la fibra óptica.

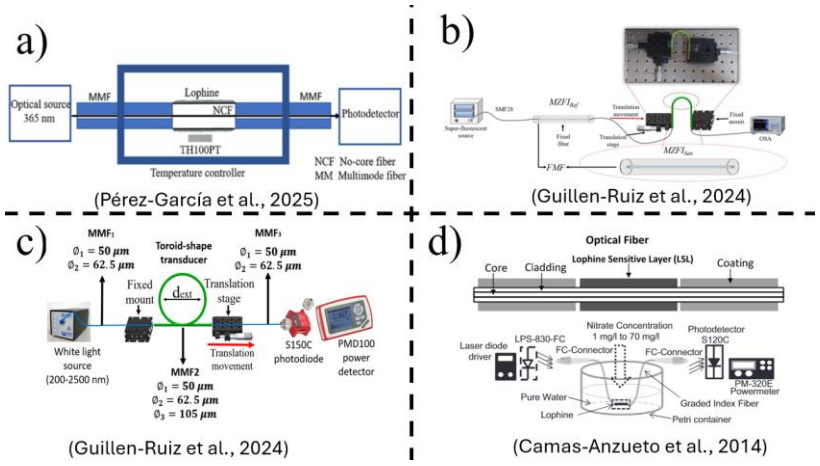


Figura 13. Aplicaciones de sensores de fibra óptica para la medición de temperatura, desplazamiento y concentración química mediante diferentes configuraciones y mecanismos de interrogación óptica. Adaptado de Pérez-García et al. (2025), Guillen-Ruiz et al. (2024) y Camas-Anzueto et al. (2014).

En conjunto, estos trabajos muestran cómo diferentes mecanismos de interacción de la luz, tales como cambios de intensidad, interferencia modal y modificaciones espectrales inducidas por materiales sensibles, pueden aprovecharse para desarrollar sensores capaces de medir diversas magnitudes de interés en aplicaciones ambientales, industriales y de monitoreo estructural. Además, evidencian la versatilidad de la fibra óptica para el monitoreo de diversas magnitudes físicas y químicas mediante diversas técnicas de interrogación óptica.

Conclusiones.

La fibra óptica ha evolucionado desde su papel tradicional en las telecomunicaciones hasta convertirse en una tecnología ampliamente utilizada en sistemas de sensado. Los principios que permiten la transmisión eficiente de la información, como la reflexión total interna y la propagación controlada de la luz, también constituyen la base del desarrollo de sensores capaces de detectar cambios en diversas variables físicas y químicas.

A lo largo de este trabajo se mostró que fenómenos considerados limitaciones en las telecomunicaciones, como las pérdidas por curvatura, la atenuación, las interferencias y el acoplamiento modal, pueden aprovecharse como mecanismos de medición de alta sensibilidad. Asimismo, se describieron las principales técnicas de interrogación basadas en la intensidad, la fase, la longitud de onda y la polarización, así como diversas aplicaciones desarrolladas para la medición de desplazamientos, vibraciones, temperatura, pH y concentración química.

Los ejemplos presentados demuestran la versatilidad de los sensores de fibra óptica y su potencial para aplicaciones de monitoreo estructural, industrial, ambiental y biomédico. En consecuencia, tecnologías originalmente diseñadas para mejorar las comunicaciones han dado lugar a herramientas de medición cada vez más precisas, compactas y robustas, lo que ha consolidado la fibra óptica como una de las plataformas más prometedoras para el desarrollo de sistemas avanzados de sensado.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto (No. 25373.26-P y 25416.26-P) a través de la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos. LEGR agradece el apoyo de SECIHTI para la beca de doctorado y el financiamiento del Proyecto No. CBF-2025-I-2863 de la Convocatoria de Ciencia Básica y de Frontera 2025.

Referencias bibliográficas.

Camas-Anzueto, J. L., Aguilar-Castillejos, A. E., Castañón- González, J. H., Lujpán-Hidalgo, M. C., Hernández De León, H. R., & Mota Grajales, R. (2014). *Fiber sensor based on Lophine sensitive layer for nitrate detection in drinking water.* Optics and Lasers in Engineering, 60, 38–43. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.04.001.

Chomycz, B. (1998). *Instalaciones de Fibra Óptica: Fundamentos, Técnicas y Aplicaciones* (McGraw-Hill, Ed.).

Coimbra G., E. (2011). *Transmisión de datos por fibra óptica [Presentación]*. Comunicaciones Ópticas. http://www.coimbraweb.com.

Fundación Telefónica. (2021, 22 de junio). *El mapa de los cables submarinos de internet: Las vías ocultas que conectan el mundo. Espacio Fundación Telefónica*. https://espacio.fundaciontelefonica.com/noticia/el-mapa-de-los-cables-submarinos-de-internet-las-vias-ocultas-que-conectan-el-mundo/ .

Guillen-Ruiz, L. E., Anzueto-Sánchez, G., Martínez-Rios, A., Jiménez-Mares, M. C., & Martin-Vela, J. A. (2024). *High-sensitivity displacement sensor using few-mode optical fibers and the optical Vernier effect.* Applied Sciences, 14(20), 9300. https://doi.org/10.3390/app14209300.

Guillen-Ruiz, L. E., Camas-Anzueto, J. L., Anzueto-Sánchez, G., & Gómez Perez, J. (2024). *Identification of structured optical fibers with adequate sensitivity and range for displacement sensors in structural health monitoring applications.* En Optica Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP 2024). Optica Publishing Group.

Guillen-Ruiz, L., Anzueto-Sanchez, G., Martínez-Rios, A., Camas-Anzueto, J., Nuñez-Gomez, R. E., & Martin-Vela, J. A. (2023). *Demonstration of improving the performance of a fibre optic displacement sensor using the optical harmonic Vernier effect by cascading tapered optical single-mode fibres.* IEEE Photonics Journal, 15(5), 7101309. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3303083.

Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson.

Hernández-García, J. C., Estudillo-Ayala, J. M., Rojas-Laguna, R., Mata Chávez, R. I., Martínez-Ríos, A., Gutiérrez, J. G., Trejo-Durán, M., Vargas-Rodríguez, E., Andrade-Lucio, J. A., & Alvarado-Méndez, E. (2010). *Instrumentación y diseño de una fuente de alto voltaje para fabricar rejillas de fibra óptica mediante la técnica de arco eléctrico.* Revista mexicana de física, 56(3), 255–261.

Morales-Navarro, A. R., Grajales-Coutiño, R., Camas-Anzueto, J. L., Juárez-Ontiveros, A., & Megchum-Ruedas, C. A. (2024). *Optomechatronic system to quantify the rotation of linear polarization of light in temperature-controlled chromoactive materials*. En Optica Latin America Optics and Photonics Conference (LAOP 2024). Optica Publishing Group.

Pérez Toalá, J., Gómez Pérez, J., Camas Anzueto, J. L., Grajales Coutiño, R., Velasco Bolom, P. M., & Guillén Ruiz, L. E. (2025). *Medición de vibraciones utilizando tecnología de fibra óptica*. Pistas Educativas, 46(149), 870–885.

Pérez-García, G. F., Camas-Anzueto, J. L., Ruíz-Pérez, V. I., Anzueto-Sánchez, G., López-Estrada, F. R., & Pérez-Patricio, M. (2021). *Fiber-optic temperature sensor using a no-core fiber structure configuration coated with thermochromic material.* Optical Engineering, 60(11), 117107. https://doi.org/10.1117/1.OE.60.11.117107.

Velasco-Bolom, P. M., Camas-Anzueto, J. L., Meza-Gordillo, R., Pérez-Patricio, M., Ramírez-Morales, M., Anzueto-Sánchez, G., Grajales-Coutiño, R., & Hoyo-Montaño, J. A. (2025). Optical characterization of a sensitive lophine layer for the detection of hydrogen ions (H+). Optics, 6(4), 58. https://doi.org/10.3390/opt6040058.

Información de los autores.



Luis Enrique Guillen Ruiz, ingeniero mecánico del Tecnológico Nacional de Tuxtla Gutiérrez (ITTG, 2015). Terminó su maestría en ingeniería mecatrónica (ITTG, 2022). Actualmente cursa el 8.º semestre del doctorado en Ciencias de la Ingeniería del ITTG con

el tema “desarrollo de un sensor de fibra óptica para medir desplazamientos en puentes de concreto armado”. Su principal línea de investigación es la de los sensores de fibra óptica. Pertenece al sistema estatal de investigadores desde 2023.



Jorge Luis Camas Anzueto Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Ciencias con Especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y Electrónica (INAOE), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) nivel II, miembro honorífico del Sistema Estatal de Investigadores por el Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Chiapas (ICTICH) y galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III por el COCyTECH. Participó en la creación de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM), además del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).



Joel Gómez Pérez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2005 y Maestro en Ciencias enIngeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013. Ha colaborado con la Universidad Politécnica de Chiapas en el área de Ingeniería en Mecatrónica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010 y colaborador de la Universidad del Valle de México desde 2013. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2011.



Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez, y la Maestría y el Doctorado en Ciencias, con especialidad en Óptica, por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó dos estancias Postdoctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Sus investigaciones están dirigidas a la optoelectrónica, a los sensores de fibra óptica y al desarrollo de láseres de fibra dopada, tanto continuos como pulsados, ajustables a múltiples longitudes de onda. Actualmente, es profesor-investigador en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Madaín Pérez Patricio se graduó como Doctor en Ciencias en Automatización y Computación Industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador y Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro del Claustro Doctoral "Doctorado en Ciencias de la Ingeniería", perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad, I.T. de Tuxtla Gutiérrez, desde 2016. Miembro del Sistema Estatal Nivel 2. Miembro de la IEEE (2015). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II (2024).

La importancia del desarrollo de la fotónica en el Tecnológico Nacional de México: perspectivas y oportunidades.

The Importance of Photonics Development at the Tecnológico Nacional de México: Perspectives and Opportunities.

Ramón Jiménez López (1).
Tecnológico Nacional de México.

Gaudencio Lucas Bravo (2). Tecnológico Nacional de México.

Gustavo Emilio Rojo Velázquez (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Piedras Negras.

Rafael Portillo Rosales (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí.

David Noriega Urquidez (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Mazatlán.

Jorge Antonio Acosta Calderón (6). Tecnológico Nacional de México.

Jorge Luis Camas Anzueto* (7). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Ramón Díaz de León Zapata (8). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, ramon.dd@slp.tecnm.mx.

Rubén Grajales Coutiño (9). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx.

Irving Paul Vargas Cruz (10). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, irving.vc@slp.tecnm.mx.

Pedro Marcos Velasco Bolom (11). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, D09270506@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 02, 2026; aceptado en octubre 05, 2026.

Resumen.

La fotónica se ha consolidado como un área científica y tecnológica transversal, estrechamente relacionada con el desarrollo que impacta en las diferentes ingenierías. En este contexto, el Tecnológico Nacional de México (TecNM) tiene presencia en toda la República Mexicana, preparando profesionalmente ingenieras e ingenieros, y constituye un espacio estratégico para fortalecer la enseñanza, la investigación y la aplicación de esta disciplina científica. En este artículo se presenta una reflexión sobre la importancia de impulsar el desarrollo de la fotónica en el TecNM, tomando como punto de referencia la experiencia académica y de investigación que puede estar vinculada a diferentes programas de ingeniería, particularmente en áreas como electrónica, mecatrónica, telecomunicaciones,

semiconductores, materiales, sistemas computacionales, inteligencia artificial, energía y agroindustria. Por lo tanto, la fotónica debe integrarse como una disciplina científica y tecnológica capaz de aportar conocimientos actualizados que fortalezcan la formación profesional de recursos humanos de calidad. A partir de este análisis, es necesario fortalecer la fotónica dentro del TecNM y preparar recursos humanos capaces no solo de utilizar tecnologías fotónicas, sino también de comprenderlas, adaptarlas y desarrollar soluciones propias ante los retos científicos, industriales y sociales que enfrenta México.

Palabras clave: Desarrollo tecnológico, fotónica, educación en ingeniería, tecnologías habilitadoras, Tecnológico Nacional de México.

Abstract.

Photonics has become established as a cross-cutting scientific and technological field, closely linked to developments that impact different branches of engineering. In this context, the Tecnológico Nacional de México (TecNM) has a nationwide presence throughout Mexico, providing professional education for engineers, and represents a strategic environment for strengthening the teaching, research, and application of this scientific discipline. This article presents a reflection on the importance of promoting the development of photonics within TecNM, taking as a reference the academic and research experience that can be linked to different engineering programs, particularly in areas such as electronics, mechatronics, telecommunications, semiconductors, materials, computer systems, artificial intelligence, energy, and agroindustry. Therefore, photonics should be integrated as a scientific and technological discipline capable of providing up-to-date knowledge that strengthens the professional education of highly qualified human resources. Based on this analysis, it is necessary to strengthen photonics within TecNM and to prepare human resources capable not only of using photonic technologies, but also of understanding and adapting them, as well as developing their own solutions to address the scientific, industrial, and societal challenges facing Mexico.

Keywords: Enabling technologies, engineering education, photonics, technological development, Tecnológico Nacional de México.

1. Introducción.

La fotónica en México avanza con paso firme, presentando diversos desarrollos científicos, lo que se refleja en la necesidad de crear programas educativos. La óptica estudia la generación, la propagación y la interacción de la luz con la materia. La fotónica integra principios de la óptica, la electrónica, la física de materiales y otras áreas para desarrollar dispositivos y sistemas en los que la luz se utiliza para transportar, procesar, detectar o transformar información y energía. En este contexto, tanto la óptica como la fotónica son disciplinas estrechamente vinculadas que, junto con la electrónica de precisión, permiten desarrollar sistemas fotónicos avanzados que impactan en el desarrollo de tecnologías que resuelven problemas en las diferentes áreas de la ingeniería. De esta manera, se entiende que la electrónica genera, acondiciona y procesa las señales eléctricas; la óptica proporciona los principios físicos que explican la propagación y la manipulación de la luz; y la fotónica permite concebir e integrar el sistema completo para generar, modular, transportar y detectar información mediante fotones. Dada la importancia de la fotónica, es fundamental que el Tecnológico Nacional de México desarrolle estrategias para fortalecer el conocimiento de nuevas disciplinas que potencien la enseñanza y la investigación, converjan en proyectos de investigación multidisciplinarios de frontera y tengan presencia a nivel nacional e internacional. En esta dirección, el Tecnológico Nacional de México no debe limitarse a ser un simple espectador ante el avance de otras instituciones que están participando fuertemente en el desarrollo de la fotónica en México, sino que debe asumir un papel activo en el desarrollo de disciplinas emergentes que contribuyan al cumplimiento de los objetivos establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo de México. En 2016 se publicó “Hacia un México más brillante: Mapa de Ruta de Óptica y Fotónica”, una iniciativa que planteó una estrategia para aprovechar las capacidades científicas, tecnológicas e industriales existentes en México y favorecer el desarrollo de la óptica y la fotónica como sectores estratégicos. El documento reconocía que estas disciplinas constituían tecnologías habilitadoras con aplicaciones en numerosos sectores y proponía fortalecer la articulación entre academia, industria y gobierno, así como la formación de recursos humanos especializados. La óptica

y la fotónica representan áreas estratégicas capaces de fortalecer la competitividad, la sostenibilidad, la eficiencia energética y la salud en México. Por ello, ProMéxico, en colaboración con la International Commission for Optics (ICO) y la Academia Mexicana de Óptica (AMO), propuso una ruta para impulsar el desarrollo del sector y fortalecer el liderazgo tecnológico y empresarial del país (ProMéxico, 2016). A diez años de la iniciativa, las propuestas siguen vigentes; sin embargo, el escenario tecnológico, tanto a nivel nacional como internacional, ha cambiado sustancialmente. Hoy en día, han emergido disciplinas como la inteligencia artificial, la ingeniería de semiconductores, la fotónica integrada, las comunicaciones ópticas de alta velocidad, los sensores inteligentes, las tecnologías cuánticas, y sistemas de manufactura avanzados que necesita de las tecnologías basadas en la generación, manipulación, transmisión y detección de la luz. Este nuevo escenario es relevante para México, ya que el Plan México establece como objetivo incrementar el contenido nacional en las cadenas globales de valor de sectores estratégicos como la electrónica, los semiconductores, la automotriz, la aeroespacial, la farmacéutica y la química. Asimismo, plantea fortalecer el desarrollo científico y tecnológico, así como la innovación, y formar anualmente 150 mil profesionistas y técnicos adicionales con una preparación alineada con los sectores estratégicos (Secretaría de Economía, 2025). Estas prioridades muestran que la formación de capital humano especializado constituye uno de los elementos centrales de la estrategia actual de desarrollo tecnológico del país.

Con el advenimiento de nuevas tecnologías, el sector de los semiconductores ha cobrado interés a nivel mundial. Por lo tanto, la visión de México debe establecer objetivos claros e impulsar el fortalecimiento de nuevas capacidades. México cuenta actualmente con un Plan Maestro de Semiconductores 2024–2030, mediante el cual se busca fortalecer la participación nacional en esta cadena de valor. En mayo de 2025, la Secretaría de Economía informó que se habían alcanzado 16 de las 30 metas inicialmente establecidas en dicho plan (Secretaría de Economía, mayo 2025). Posteriormente, las secretarías de Educación Pública, Economía y Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación impulsaron acciones de actualización curricular, aprendizaje digital y microcredenciales orientadas específicamente a la formación de recursos humanos para este sector (Secretaría de Economía, septiembre de 2025).

Con este enfoque, México debe considerar la fotónica como una ciencia capaz de integrarse en las diferentes ingenierías con el objetivo de potenciar el desarrollo tecnológico en múltiples aplicaciones. La fabricación y caracterización de dispositivos semiconductores requieren tecnologías ópticas en diferentes etapas, entre ellas litografía, microscopía, espectroscopía, metrología, inspección óptica y caracterización de materiales. Al mismo tiempo, los propios semiconductores constituyen la base de numerosos dispositivos fotónicos y optoelectrónicos, como diodos emisores de luz, láseres semiconductores, fotodetectores, celdas fotovoltaicas, sensores de imagen y circuitos fotónicos integrados. Esto posibilita el fortalecimiento nacional en semiconductores, lo que exige la oportunidad de potenciar la formación en óptica, optoelectrónica y fotónica.

En este análisis superficial, pero de vital importancia, el Tecnológico Nacional de México ha emprendido la estrategia de crear oportunidades para desarrollar áreas emergentes que desempeñen un papel importante y permitan contar con presencia nacional e internacional. Esto se logra mediante la creación de una estrategia nacional para la formación de recursos humanos en áreas emergentes. En 2026, el TecNM y la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior pusieron en marcha un Diplomado Nacional en Diseño de Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASIC), orientado al fortalecimiento de las capacidades nacionales en semiconductores (Tecnológico Nacional de México-ANUIES, 2026). Asimismo, dentro del propio TecNM se ofrecen actualmente programas como la Ingeniería en Semiconductores, la Maestría en Semiconductores y la Especialidad en Semiconductores (Tecnológico Nacional de México, Maestría en semiconductores y CENIDET 2026). Por ello, es necesario plantear una pregunta que describa la reacción del TecNM ante esta evolución tecnológica y científica: si el TecNM está fortaleciendo sus capacidades en semiconductores, inteligencia artificial, electrónica, manufactura avanzada, nanotecnología y materiales, ¿qué papel debería desempeñar la fotónica en esta transformación?

En esta pregunta se establece la autocrítica de una institución que hoy en día es de las que más ingenieros gradúa anualmente en diversas disciplinas. Por lo tanto, una respuesta quizá no sea crear de manera inmediata nuevos programas educativos especializados exclusivamente en fotónica. Sin embargo, es necesario dar a conocer que la fotónica es una disciplina transversal que debe aprovecharse de las capacidades ya existentes en las diferentes ingenierías del TecNM. En Ingeniería Electrónica puede aproximarse a la fotónica mediante la optoelectrónica y los dispositivos; telecomunicaciones con sistemas de comunicaciones por fibra óptica; mecatrónica con el desarrollo de sensores y sistemas optomecatrónicos; materiales se puede enlazar con espectroscopía y caracterización óptica;

semiconductores con dispositivos optoelectrónicos y fotónica integrada; sistemas computacionales e inteligencia artificial mediante visión artificial, procesamiento de imágenes y análisis de información proveniente de sensores; mientras que las áreas de energía, ambiente y agroindustria pueden hacerlo a través de tecnologías fotovoltaicas, sensores ópticos, espectroscopía y técnicas fotónicas aplicadas al monitoreo de procesos. Esto permite replanteamientos fundamentales establecidos en el documento "Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica", al desarrollar cómo los recursos humanos y las capacidades nacionales aprovechan las fortalezas existentes en diversas disciplinas científicas y de ingeniería (ProMéxico, 2016).

Ante esta nueva exigencia, es necesario establecer una estrategia para el desarrollo de la fotónica en el TecNM. Se puede construir progresivamente una formación y actualización docente; la incorporación de contenidos de óptica y fotónica en asignaturas existentes; el desarrollo de actividades experimentales accesibles y de herramientas de simulación; la creación de diplomados y especialidades; el fortalecimiento de laboratorios; la integración de proyectos interdisciplinarios de licenciatura y posgrado; y la formación de redes de colaboración entre institutos tecnológicos, centros de investigación y sectores productivos.

A diez años del documento "Hacia un México más brillante: mapa de ruta de óptica y fotónica," México enfrenta un escenario tecnológico diferente al de 2016, pero la necesidad de desarrollar capacidades en fotónica no ha desaparecido; por el contrario, la convergencia entre fotónica, electrónica, semiconductores, inteligencia artificial, comunicaciones y tecnologías cuánticas amplía sus posibilidades. La extensa comunidad académica y estudiantil del Tecnológico Nacional de México, así como la diversidad de sus programas de ingeniería y su presencia en diferentes regiones del país, representan una oportunidad para contribuir a esta nueva etapa.

2. La fotónica y su relación con las ingenierías del Tecnológico Nacional de México.

Como parte del Tecnológico Nacional de México, es necesario posicionar la fotónica como oportunidad de integrarse de manera natural con las distintas ingenierías que se ofrecen en nuestra institución. Es fundamental que cada docente e investigador conozca las oportunidades que ofrece la fotónica y cómo su tecnología puede adaptarse y enriquecer el trabajo en nuestros institutos tecnológicos.

La fotónica es una ciencia que no debe aislarse, sino abordarse como un componente transversal capaz de fortalecer nuestros programas educativos. En este momento no es necesario crear una nueva carrera en fotónica, por lo que cada ingeniería puede abordar la fotónica desde sus propias bases y necesidades. Esta flexibilidad es una gran ventaja para el TecNM, ya que se cuenta con una comunidad diversa y capacidades académicas distribuidas a lo largo y ancho del país. Nuestro reto es identificar estas fortalezas, articularlas y crear mecanismos para que el conocimiento se comparta y se potencie entre nuestros institutos, centros y unidades.

Es necesario señalar que no todos los institutos tecnológicos cuentan con laboratorios especializados en fotónica, pero se puede contemplar adquirir conocimientos que fortalezcan gradualmente la interacción de la fotónica con las diferentes ingenierías de nuestra Institución. Es posible avanzar gradualmente mediante contenidos curriculares, prácticas experimentales accesibles, simuladores, proyectos integradores, cursos de actualización y de formación docente. A partir de estas bases, pueden desarrollarse posteriormente diplomados, especialidades, líneas de investigación, laboratorios y programas de posgrado, de acuerdo con las capacidades y necesidades de cada región.

Esta visión está alineada con la esencia de nuestro Tecnológico Nacional de México. Nuestra mayor fortaleza es la ingeniería y la capacidad de vincular el conocimiento científico con soluciones a problemas reales. Por eso, la fotónica debe verse como una oportunidad para enriquecer y conectar nuestras ingenierías, preparándonos para enfrentar los retos de los sectores productivos que cada vez demandan más estas tecnologías.

Nuestro gran desafío en los próximos años será pasar de esfuerzos individuales a una verdadera estrategia de colaboración. Necesitamos identificar grupos de trabajo, infraestructura, programas y proyectos relacionados con la óptica y la fotónica en todo el TecNM. Imaginemos una red activa entre nuestros institutos, donde la experiencia, la

infraestructura y el talento puedan compartirse; donde estudiantes y profesores tengan movilidad y donde los proyectos multidisciplinarios respondan tanto a necesidades regionales como nacionales.

Fortalecer la fotónica en el Tecnológico Nacional de México significa ampliar las herramientas con las que formamos a nuestras y nuestros ingenieros. No se trata solo de sumar una tecnología más, sino de darles la capacidad de entender cómo procesar la luz como un medio que transporta información y que puede llevar a un procesamiento con electrónica de precisión, que ofrezca una aplicación: en particular, en un entorno donde convergen semiconductores, electrónica, inteligencia artificial, manufactura avanzada y nuevas tecnologías de comunicación, esta visión permitirá que nuestro estudiantado no solo utilice la tecnología, sino que también la adapte, la mejore y desarrolle soluciones propias para las necesidades de nuestro país. (Tecnológico Nacional de México, oferta educativa, 2026). En la Tabla 1 se presenta de forma resumida la relación que existe entre la fotónica y las diferentes carreras de ingeniería que oferta nuestra Institución, asimismo ejemplifica una aplicación y la técnica posible de utilización.

Tabla 1. Relación de la fotónica con las diferentes Ingenierías que oferta el Tecnológico Nacional de México.

Carreras	Relación con la fotónica	Ejemplo de la aplicación
1. Arquitectura	Iluminación, colorimetría, óptica y eficiencia energética	Iluminación natural, diseño lumínico, sensores de ocupación, fotovoltaicas
2. Contador Público	Relación indirecta: gestión económica de tecnologías fotónicas	Costeo de sistemas fotovoltaicos, evaluación financiera de proyectos tecnológicos
3. Gastronomía	Espectroscopia, imagen y sensores ópticos para alimentos	Control de color, espectroscopia NIR, detección de calidad y adulteración
4. Ingeniería Ambiental	Sensores ópticos y espectroscopia ambiental	Monitoreo de agua, gases y contaminantes; fluorescencia, Raman, absorción
5. Ingeniería Biomédica	Biofotónica, imagen, láseres y sensores	Oximetría, endoscopia, OCT, espectroscopia, diagnóstico y terapia láser
6. Ingeniería Bioquímica	Interacción luz-materia y biosensores	Fluorescencia, absorbancia UV-Vis, Raman, biosensores ópticos
7. Ingeniería Civil	Sensores fotónicos y metrología óptica	FBG, interferometría, sensores distribuidos, monitoreo de salud estructural
8. Ingeniería Eléctrica	Optoelectrónica, fotovoltaica e instrumentación	Sistemas fotovoltaicos, sensores ópticos, comunicaciones ópticas de potencia
9. Ingeniería Electromecánica	Sensado óptico de variables mecánicas y eléctricas	Vibración, temperatura, desplazamiento, monitoreo de máquinas
10. Ingeniería Electrónica	Una de las vinculaciones más directas: optoelectrónica y sistemas fotónicos	LED, láseres, fotodetectores, moduladores, instrumentación fotónica
11. Ingeniería en Acuicultura	Sensores ópticos y espectroscopia del agua	Oxígeno disuelto, turbidez, clorofila, pH y calidad del agua
12. Ingeniería en Administración	Gestión de innovación y empresas tecnológicas	Gestión de proyectos de fotónica, transferencia tecnológica y emprendimiento
13. Ingeniería en Aeronáutica	Sensores de fibra óptica y sistemas ópticos embebidos	FBG, SHM, LIDAR, navegación óptica, comunicaciones ópticas
14. Ingeniería en Agronomía	Agrofotónica y agricultura de precisión	Espectroscopia de cultivos, imágenes multiespectrales, láseres, sensores de fibra óptica

15. Ingeniería en Animación Digital y Efectos Visuales	Formación y procesamiento óptico de imágenes	Cámaras, captura 3D, iluminación, colorimetría, realidad virtual
16. Ingeniería en Biotecnología	Biofotónica y caracterización óptica	Microscopía, fluorescencia, espectroscopia, biosensores
17. Ingeniería en Desarrollo Comunitario	Tecnologías fotónicas aplicadas a necesidades sociales	Iluminación eficiente, energía solar, sensores ambientales y de agua
18. Ingeniería en Diseño Industrial	Óptica aplicada al diseño, iluminación y manufactura	Escaneo 3D, metrología láser, iluminación LED, manufactura láser
19. Ingeniería en Energías Renovables	Fotovoltaica y aprovechamiento de radiación solar	Celdas solares, caracterización espectral, concentradores solares
20. Ingeniería en Geociencias	Espectroscopia, teledetección y LIDAR	Caracterización mineral, imágenes hiperespectrales, topografía LIDAR
21. Ingeniería en Gestión Empresarial	Innovación y comercialización de tecnologías fotónicas	Gestión de empresas de semiconductores, sensores, telecomunicaciones y energía solar
22. Ingeniería en Industrias Alimentarias	Fotónica para análisis no destructivo	NIR, Raman, fluorescencia, visión artificial y control de calidad
23. Ingeniería en Innovación Agrícola Sustentable	Agrofotónica y sensado para agricultura inteligente	Drones con cámaras multiespectrales, sensores ópticos, evaluación de estrés vegetal
24. Ingeniería en Logística	Identificación y trazabilidad mediante tecnologías ópticas	Lectores ópticos de códigos de barras y QR, trazabilidad de productos
25. Ingeniería en Materiales	Materiales ópticos y fotónicos	Materiales luminiscentes, cromogénicos, películas delgadas, fibras ópticas y semiconductores
26. Ingeniería en Minería	Espectroscopia y sensado remoto	Raman, LIBS, NIR, análisis mineralógico y LIDAR
27. Ingeniería en Nanotecnología	Nanofotónica y materiales nanoestructurados	Plasmónica, puntos cuánticos, metasuperficies, nanosensores
28. Ingeniería en Pesquerías	Sensado óptico del ambiente acuático	Calidad del agua, visión submarina, fluorescencia y sensores de oxígeno
29. Ingeniería en Sistemas Automotrices	Sensores, iluminación y comunicaciones ópticas	LIDAR, cámaras, iluminación LED/láser, sensores ópticos
30. Ingeniería en Sistemas Computacionales	Procesamiento computacional de información fotónica	Visión artificial, procesamiento de imágenes, señales espectrales, IA aplicada a sensores ópticos
31. Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones	Comunicaciones ópticas	Fibra óptica, WDM, transmisores/receptores, redes ópticas
32. Ingeniería Forestal	Teledetección y fotónica aplicada a vegetación	LIDAR forestal, imágenes multiespectrales, evaluación de biomasa
33. Ingeniería Hidrológica	Sensores ópticos y monitoreo hídrico	Turbidez, contaminantes, nivel, caudal, sensores distribuidos de fibra óptica
34. Ingeniería Industrial	Metrología, automatización y manufactura fotónica	Visión artificial, inspección óptica, corte láser, sensores ópticos industriales
35. Ingeniería Informática	Tratamiento digital de datos e imágenes fotónicas	Procesamiento de imágenes, espectros, visión computacional, análisis con IA

36. Ingeniería Mecánica	Metrología y diagnóstico óptico	Interferometría, vibrometría láser, termografía, medición de desplazamiento
37. Ingeniería Mecatrónica	Óptica integrada, electrónica, mecánica y control	Sistemas optomecatrónicos, sensores fotónicos, visión artificial, posicionamiento láser
38. Ingeniería Naval	Sensores y comunicaciones ópticas en ambientes marinos	Fibra óptica, sensores de deformación, LIDAR, comunicaciones ópticas submarinas
39. Ingeniería Petrolera	Sensores fotónicos para condiciones extremas	Sensores distribuidos de temperatura y deformación, Raman, Brillouin, FBG
40. Ingeniería Química	Espectroscopia y sensores químicos	FTIR, Raman, UV-Vis, fluorescencia, sensores de gases
41. Licenciatura en Administración	Gestión y transferencia de tecnologías fotónicas	Administración de proyectos tecnológicos, innovación y comercialización
42. Licenciatura en Biología	Biofotónica, microscopía y espectroscopia	Fluorescencia, microscopía confocal, Raman, imágenes biológicas
43. Licenciatura en Turismo	Aplicaciones indirectas en iluminación, patrimonio y digitalización	Iluminación de patrimonio, escaneo 3D, realidad aumentada, conservación
44. Ingeniería en Semiconductores	Relación directa con la fotónica y la optoelectrónica	LED, diodos láser, fotodiodos, celdas solares, fotónica integrada
45. Ingeniería Ferroviaria	Sensores ópticos, comunicaciones y monitoreo estructural	FBG, fibra distribuida, detección de vibraciones, SHM, comunicaciones
46. Medicina Veterinaria y Zootecnia	Biofotónica y diagnóstico óptico aplicado a animales	Imagen óptica, espectroscopia, sensores biomédicos, láser terapéutico

3. La fotónica ante las nuevas áreas estratégicas en México.

México hoy en día necesita esclarecer la visión de la ciencia y la tecnología; debe ocupar un lugar importante en las estrategias de crecimiento económico y de fortalecimiento de las capacidades productivas nacionales. El Plan México establece, entre sus metas para 2030, incrementar en 15 % el contenido nacional en las cadenas globales de valor de sectores como el automotriz, aeroespacial, electrónico, de semiconductores, farmacéutico y químico. Asimismo, plantea formar anualmente 150 mil profesionistas y técnicos con preparación constante alineada con sectores estratégicos (Secretaría de Economía, Plan México, 20259).

Este escenario cobra importancia para el desarrollo de la fotónica, debido a su carácter transversal y a su relación con muchas de estas áreas. Uno de los ejemplos más claros se observa en el fuerte auge de los semiconductores. En 2025, el Gobierno de México anunció la creación del Centro Nacional de Diseño de Semiconductores Kutsari, concebido para aprovechar las capacidades de las instituciones públicas de educación superior y de los centros de investigación. La estrategia contempla fortalecer progresivamente los tres grandes eslabones de esta industria: diseño; fabricación; y ensamble, pruebas y empaquetado (Presidencia de la República, 2025).

Actualmente, se ha enfatizado el crecimiento de los semiconductores como área estratégica, lo que otorga relevancia a la fotónica, ya que ambas áreas están estrechamente ligadas. Como se mencionó antes el proceso de fabricación y caracterización de dispositivos semiconductores requieren técnicas exactas como la litografía, la microscopía, la interferometría, la espectroscopía y la inspección óptica. Al mismo tiempo, los materiales semiconductores constituyen la base de dispositivos fotónicos y optoelectrónicos como los LEDs, los láseres, los fotodetectores, los sensores de

imagen y las celdas fotovoltaicas. Por ello, fortalecer las capacidades nacionales en semiconductores también abre la posibilidad de ampliar la formación en óptica, optoelectrónica, optomecatrónica y fotónica.

La inteligencia artificial es actualmente una disciplina para el desarrollo de la fotónica en el procesamiento óptico proveniente de sistemas optomecatrónicos que integran visión por computadora, espectrómetros y sensores ópticos, y que puede procesarse mediante algoritmos de IA para reconocer patrones, clasificar materiales, identificar defectos o monitorear procesos. Esta integración entre fotónica, electrónica y procesamiento de la información permite visualizar nuevas aplicaciones en manufactura, salud, agricultura, seguridad, medio ambiente y sistemas autónomos.

Algo similar ocurre en la manufactura avanzada, ya que el uso de tecnología láser asegura precisión al integrarse con la interferometría; la visión artificial y otras técnicas ópticas permiten realizar mediciones de alta precisión e inspecciones sin contacto. La fotónica puede, por tanto, participar en el proceso de fabricación como en la evaluación de la calidad del producto obtenido.

Las oportunidades de aplicación de la fotónica son importantes en diferentes áreas estratégicas de la nación, como los sistemas energéticos, la salud, el medio ambiente y la agroindustria. Las tecnologías fotovoltaicas permiten aprovechar la radiación solar; la espectroscopía y los sensores ópticos permiten analizar materiales y detectar determinadas sustancias; mientras que los sistemas de imagen y los láseres tienen numerosas aplicaciones médicas. En agricultura, agroindustria y agrofotónica, las tecnologías ópticas ofrecen posibilidades para monitorear cultivos, caracterizar alimentos, estudiar la interacción de la radiación con los tejidos vegetales y desarrollar métodos de análisis no destructivos.

En consecuencia, México necesita incentivar la actualización profesional en diversas disciplinas científicas que fortalezcan las capacidades tecnológicas e industriales del país. En septiembre de 2025, las Secretarías de Educación Pública, Economía y Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación se reunieron para establecer estrategias para la actualización curricular de las microcredenciales en semiconductores. En ese momento, se reportaron 184 mil estudiantes de educación media superior en carreras técnicas relacionadas con este sector, entre ellas electrónica, mecatrónica, robótica, inteligencia artificial y ciencia de datos (Secretaría de Educación Pública, 2025).

Estos elementos permiten advertir que las nuevas tendencias en fotónica no se desarrollan de forma independiente. Por ejemplo, en el Tecnológico Nacional de México se ofrecen ingenierías en semiconductores, electrónica, inteligencia artificial y telecomunicaciones, que, en conjunto con la fotónica, presentan una fuerte convergencia que fortalecerá los proyectos multidisciplinarios. Ante este escenario, resulta pertinente considerar la fotónica como una disciplina científica que puede contribuir a la formación de recursos humanos y al desarrollo de soluciones de mayor valor agregado para México.

4. Oportunidades para el desarrollo de la fotónica en el Tecnológico Nacional de México.

El Tecnológico Nacional de México cuenta con más de 40 ingenierías, como se muestra en la Tabla 1, lo que permite a la institución impulsar progresivamente el desarrollo de la fotónica. La oportunidad no consiste necesariamente en comenzar por crear una nueva carrera, sino en reconocer las capacidades existentes en electrónica, mecatrónica, telecomunicaciones, semiconductores, materiales, sistemas computacionales, inteligencia artificial, energía y otras disciplinas, y en establecer mecanismos que permitan su convergencia con las tecnologías fotónicas.
La experiencia nacional reciente demuestra la importancia que está adquiriendo la formación especializada con formación continua alineada con sectores estratégicos (Secretaría de Economía, Plan México, 20259; Secretaría de Educación Pública, 2025).

Esta orientación representa una oportunidad para el TecNM, por lo que una primera acción podría ser la de fortalecer la formación y la actualización del cuerpo docente en fotónica. Profesores de las diferentes carreras descritas en la Tabla 1 podrían incorporar progresivamente conceptos relacionados con la óptica, los láseres, la optoelectrónica, la fibra óptica, los sensores, la espectroscopía y la instrumentación. La experiencia que actualmente se desarrolla en el sector de semiconductores mediante la actualización curricular, el aprendizaje digital y las microcredenciales

demuestra que pueden construirse mecanismos flexibles de formación sin depender exclusivamente de la creación de nuevos programas educativos (Secretaría de Educación Pública, 2025).

Una segunda oportunidad se observa en la fotónica, como ciencia aliada de los programas de ingeniería existentes. Esto puede realizarse inicialmente mediante asignaturas optativas, módulos especializados, proyectos integradores, residencias profesionales, cursos y diplomados. Conforme se desarrollen capacidades académicas y exista demanda por parte de los sectores productivos, podrían consolidarse especialidades, líneas de investigación y programas de posgrado en aquellos institutos que cuenten con las condiciones necesarias.

Otra posibilidad es establecer una Red de Fotónica del TecNM con el objetivo de identificar los diferentes grupos de investigadores y docentes que conforman los cuerpos académicos. Esto permitirá realizar un inventario del equipamiento para el desarrollo de la fotónica y establecer estrategias de estancias académicas para el desarrollo de proyectos multidisciplinarios. Una estructura de esta naturaleza permitiría compartir infraestructura, participación de investigadores en la codirección de tesis, comités tutoriales, promover la movilidad académica y participar conjuntamente en convocatorias de investigación y de desarrollo tecnológico. Esta alternativa resulta atractiva para el TecNM, ya que, debido al alto costo de ciertos equipos especializados, es posible localizar laboratorios en el sur, centro y norte de la República Mexicana y aprovechar el uso conjunto de dichos equipos. No sería necesario que cada instituto dispusiera de toda la infraestructura si existieran mecanismos para compartir capacidades entre sí. En la figura 1 se presenta un esquema simplificado de las contribuciones de la fotónica a las diferentes disciplinas que pueden definir que investigadores de los diferentes Institutos logren formar una Red de fotónica.



Figura 1. Aplicaciones de la fotónica como una ciencia transversal que puede ser integrada en investigaciones multidisciplinarias.

La formación de talento es particularmente importante para el desarrollo nacional de los semiconductores. El proyecto Kutsari contempla expresamente la capacitación de ingenieros mexicanos en el diseño de circuitos integrados y el fortalecimiento de su incorporación a la cadena de valor de los semiconductores (Presidencia de la República, 2025; InnovaBienestar de México, 2026). Para el TecNM, esta tendencia abre la posibilidad de complementar la formación electrónica y de semiconductores con conocimientos de optoelectrónica, caracterización óptica, metrología, sensores y, posteriormente, fotónica integrada.

Por lo tanto, el TecNM considerará la incidencia de la fotónica y en cómo puede aportar conocimiento en las diferentes aplicaciones, acordes con las distintas regiones del país. Los Institutos ubicados en zonas con fuerte presencia electrónica o manufacturera podrían orientarse hacia semiconductores, optoelectrónica, láseres y metrología; otros podrían desarrollar capacidades en telecomunicaciones y fibra óptica; mientras que las regiones con vocación agrícola, ambiental o energética podrían encontrar oportunidades en sensores, espectroscopía, tecnologías fotovoltaicas y agrofotónica.

Finalmente, esta es una oportunidad para que el Tecnológico Nacional de México articule un esquema de enseñanza de la fotónica a nivel nacional entre los diferentes institutos que lo conforman. La formación docente, la actualización curricular, los diplomados, las especialidades, los laboratorios, las redes académicas y la vinculación con los sectores productivos pueden constituir una ruta para incorporar la fotónica como tecnología transversal. De esta manera, el TecNM puede contribuir a formar ingenieras e ingenieros capaces no solo de utilizar tecnologías desarrolladas en otros países, sino también de adaptarlas, diseñarlas y generar soluciones propias para las necesidades tecnológicas de México.

Conclusiones.

La fotónica se ha consolidado como una ciencia que puede insertarse en diversas áreas debido a su versatilidad en la manipulación, control y procesamiento de la luz como medio de transporte de información. Para el Tecnológico Nacional de México, la diversidad de sus ingenierías y su presencia en distintas regiones del país representan una oportunidad para fortalecer progresivamente la formación, la investigación y el desarrollo tecnológico en este campo.

En una primera etapa, este proceso puede irse integrando mediante la promoción de que el docente adquiera gradualmente conocimientos relacionados con la fotónica y mediante el establecimiento de una línea permanente para la incorporación progresiva de contenidos en los planes curriculares de las diferentes ingenierías. Esto se puede plantear estratégicamente a través de cursos de actualización docente, diplomados y la creación de especialidades en programas de estudio donde la fotónica les ofrece una oportunidad de crecimiento con una perspectiva prometedora en proyectos multidisciplinarios. Sin embargo, ante el crecimiento de las tecnologías basadas en la luz y su convergencia con sectores estratégicos para México, resulta pertinente considerar que, en un futuro no muy lejano, el TecNM pueda avanzar hacia la apertura de una Ingeniería en Fotónica y, de manera progresiva, de programas de Maestría y Doctorado en Fotónica o en áreas afines.

A diez años de Hacia un México más brillante, el reto consiste en articular los esfuerzos aislados de los diferentes grupos de investigadores expertos en fotónica con el objetivo de que el TecNM tenga presencia nacional e internacional. Formar recursos humanos especializados en fotónica permitiría no solo atender las necesidades tecnológicas emergentes, sino también contribuir a que México fortalezca su capacidad para generar conocimiento, desarrollar tecnología propia y participar con mayor presencia en sectores científicos e industriales de alto valor agregado.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el respaldo institucional brindado a las iniciativas orientadas al fortalecimiento de la fotónica y de las tecnologías emergentes. Asimismo, se reconoce la participación

de autoridades, directivos, docentes e investigadores de los diferentes Institutos Tecnológicos que han contribuido, mediante mesas de trabajo y espacios de colaboración académica, a la construcción de una visión conjunta para impulsar la formación, investigación y desarrollo de la fotónica dentro del TecNM.

Referencias bibliográficas.

InnovaBienestar de México. (2026). Programa Institucional de InnovaBienestar de México. Entre los pilares de Kutsari se encuentra la formación de talento mexicano en diseño de circuitos integrados y la generación de empresas de base tecnológica.

Presidencia de la República. (2025, 6 de febrero). Presidenta Claudia Sheinbaum anuncia creación del Centro Nacional de Diseño de Semiconductores "Kutsari". Gobierno de México. El proyecto contempla diseño, fabricación y posteriormente ensamble, pruebas y empaquetado de semiconductores. Gobierno de México. Centro Nacional de Diseño de Semiconductores Kutsari.

ProMéxico. (2016). Hacia un México más brillante: Mapa de ruta de óptica y fotónica. Secretaría de Economía. Clúster Mexicano de Fotónica**.** Consultar el mapa de ruta de óptica y fotónica. https://mexicanphotonicscluster.org/wp-content/uploads/2022/10/2016-12-09-MPI-TRM-Hacia-un-Me%CC%81xico-ma%CC%81s-Brillante-1.pdf.

Secretaría de Economía. (2025). Plan México. Gobierno de México. Entre sus metas para 2030 se encuentran aumentar el contenido nacional en cadenas globales de valor de sectores como electrónica y semiconductores, fortalecer ciencia y tecnología y formar 150 mil profesionistas y técnicos adicionales anualmente. https://podecobi.economia.gob.mx. Consultar Plan México.

Secretaría de Economía. (2025, 14 de mayo). Preside Marcelo Ebrard reunión de seguimiento del Plan Maestro de Semiconductores 2024–2030. Gobierno de México. Consultar Plan Maestro de Semiconductores 2024–2030. https://www.gob.mx/se/prensa/preside-marcelo-ebrard-reunion-de-seguimiento-del-plan-maestro-de-semiconductores-2024-2030?idiom=es.

Secretaría de Economía. (2025). Plan México. Gobierno de México. El documento establece, entre otras metas para 2030, incrementar 15 % el contenido nacional en cadenas globales de valor de sectores estratégicos y formar 150 mil profesionistas y técnicos anuales. https://podecobi.economia.gob.mx. Plan México — Secretaría de Economía.

Secretaría de Economía. (2025, 23 de septiembre). Las Secretarías de Educación, Economía y de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación impulsan actualización curricular y microcredenciales en semiconductores para fortalecer sectores estratégicos del Plan México. Gobierno de México. Consultar comunicado oficial. https://www.gob.mx/se/prensa/comunicado-conjunto-educacion-economia-ciencia-y-tecnologia.

Secretaría de Educación Pública. (2025, 23 de septiembre). SEP, Economía y Secihti impulsan actualización curricular y microcredenciales en semiconductores para fortalecer sectores estratégicos del Plan México. Gobierno de México. Gobierno de México. https://www.gob.mx/sep/prensa/comunicado-conjunto-26-sep-economia-y-secihti-impulsan-actualizacion-curricular-y-microcredenciales-en-semiconductores-para-fortalecer-sectores-estrategicos-del-plan-mexico.

Tecnológico Nacional de México. (2026, 19 de marzo). TecNM y ANUIES dan inicio al Diplomado Nacional en Diseño de Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASICs): del Concepto al Tapeout. El programa está explícitamente vinculado con el fortalecimiento de las capacidades nacionales en semiconductores. TecNM. https://www2.anuies.mx/anuies-y-tecnm-refrendan-compromiso-hacia-el-desarrollo-tecnologico-y-la-soberania-tecnologica-de-nuestro-pais/**.**

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Querétaro. (2026). Maestría en Semiconductores. El programa contempla explícitamente el desarrollo y caracterización de sistemas semiconductores y los sistemas y sensores semiconductores. TecNM Querétaro. Consultar Maestría en Semiconductores**.**

Tecnológico Nacional de México, CENIDET. (2026). Convocatoria de admisión: Especialidad en Semiconductores. TecNM. Consultar convocatoria CENIDET. https://cenidet.tecnm.mx/docs/convocatorias/2026/convocatoria%20agosto-2026.pdf.

Información de los autores.



Ramón Jiménez López, es un educador y servidor público con una sólida trayectoria académica y un profundo compromiso social, cuya labor ha dejado huella tanto en el ámbito educativo como en el de la gestión pública. Estudió la maestría en matemáticas educativas en el CINVESTAV del Instituto Politécnico Nacional, institución en la que también desarrolló una destacada carrera docente de 35 años. Los últimos 17 años, en la escuela superior de economía, formando generaciones de estudiantes con una visión crítica humanista y rigurosa del conocimiento. Su perfil integra de manera ejemplar la docencia, la economía, las matemáticas y la escritura, siendo además autor de una obra publicada. Su experiencia profesional se ha extendido al servicio público donde se desempeñó como director general de la red de transporte de pasajeros de la Ciudad de México 2018-2022, además de haber participado activamente en la vida política, fue diputado local en la Ciudad de México y diputado federal. Y como funcionario en la delegación Gustavo A. Madero. Estas responsabilidades han fortalecido su visión integral de las políticas públicas, la movilidad, el desarrollo social y el papel estratégico de la educación en la transformación del país. Actualmente, el profesor Ramón Jiménez López es Director General del Tecnológico Nacional de México, TecNM, desde donde ha sido punta de lanza en el posicionamiento nacional del sistema tecnológicos, como actor clave del desarrollo estratégico de México, bajo su liderazgo, el TecNM se ha consolidado como referente en sectores prioritarios para la soberanía y el crecimiento nacional. Tales como semiconductores, Litio, Industria Alimentaria, Sector Ferroviario y Tecnologías Estratégicas, alineando la formación de ingenieras e ingenieros con las necesidades reales del país. Esta visión se articula de manera directa con el plan nacional de desarrollo 2025-2030, impulsado por la Presidenta de la República Doctora Claudia Sheinbaum Pardo. Fortaleciendo la vinculación entre educación superior, ciencia, tecnología e industria, con una conducción marcada por el humanismo, la responsabilidad social y la pertinencia educativa El profesor Ramón Jiménez López encarna una dirección comprometida con la equidad, la calidad académica y el desarrollo sostenible, posicionando al Tecnológico Nacional de México como un pilar fundamental para el presente y el futuro del país.



Gaudencio Lucas Bravo, Doctor en Gestión e Intervención Educativa con una destacada trayectoria dedicada al fortalecimiento académico y la transformación social. Como Secretario Académico, de Investigación e Innovación del Tecnológico Nacional de México (TecNM), impulsa la investigación aplicada y proyectos estratégicos orientados a fortalecer la soberanía tecnológica, la salud y la productividad social. Es el coordinador principal del Modelo Educativo Humanismo para la Justicia Social, referente formativo para cerca de 600,000 estudiantes. Principales logros institucionales: Implementación del Modelo Educativo (2026): Coordina e imparte el Curso-Taller nacional Modelo Educativo del TecNM: Humanismo para la Justicia Social, promoviendo la capacitación docente y la apropiación pedagógica del modelo en los institutos del país. Representación estratégica y actualización curricular (2025): Designado por la Dirección General del TecNM ante el Consejo Educativo para la Transformación Productiva e Innovación, colaborando en aprendizaje digital, microcredenciales y actualización de planes y programas de estudios. Acreditación y evaluación (2023–2025): Consolidó el liderazgo institucional en el SEAES, impulsando a más de 240 institutos en sus procesos

de autoevaluación. Vinculación y divulgación: Promotor de redes con SADER y SEHCITI para la soberanía alimentaria, y exdirector de Cooperación y Difusión del TecNM (2022).



Gustavo Emilio Rojo Velázquez es académico y directivo del Tecnológico Nacional de México. Es egresado del Instituto Tecnológico de Piedras Negras, donde cursó Ingeniería Industrial en Electrónica entre 1990 y 1994. Posteriormente obtuvo el grado de Maestro en Ciencias y el Doctorado en Ciencias en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE); asimismo, realizó estudios de Doctorado en Políticas Educativas. Su trayectoria dentro del TecNM incluye más de dos décadas de actividad académica y de gestión; fue docente y posteriormente Subdirector Académico del Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo. Desde febrero de 2023 se desempeña como Director del Instituto Tecnológico de Piedras Negras, siendo el primer egresado de esa institución en asumir su dirección. Durante su gestión ha participado en acciones de vinculación académica e internacional, entre ellas la colaboración con Sul Ross State University International, orientada a ampliar las oportunidades académicas de los estudiantes.



Rafael Portillo Rosales, Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Máster en Ciencias de la Educación por el Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital. Actualmente Director del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí y Director de Posgrados en Educación en el Centro Universitario de Negocios y Estudios Profesionales CUNEP. Ha desempeñado cargos como Director de Docencia e Innovación Educativa, Subdirector Académico de los Institutos Tecnológicos de Gustavo A. Madero, Reynosa y Aguascalientes; Jefe del Área de Educación a Distancia del Tecnológico Nacional de México. Dirigió, coordinó y desarrolló los proyectos estratégicos del Tecnológico Nacional de México: Modelo Educativo Humanismo para la Justicia Social; colaborador en la implementación del Modelo Curricular NECTLI; Sistema Insights Macro Estudio de Pertinencia de Planes y Programas de Estudio; Desarrollo y Actualización del Manual de Lineamientos Académico Administrativos Versión 2015; Diseño y Creación del TECNM Virtual; Diseño Curricular de las Ingenierías en Inteligencia Artificial, Ciberseguridad, Ciencia de Datos, Desarrollo de Aplicaciones, Veterinaria y Zootecnia, y Asociado Profesional en Buceo; Modelo de Educación Dual y Lineamientos Académicos Versión 2022; Modelo de Educación a Distancia; Estandarización de la Plataforma Educativa; Procedimiento y Guía para la Apertura, Liquidación y Cancelación de Programas Educativos de Nivel Licenciatura. Coordinó el diseño e implementación de los Diplomados en Cadena de Valor de Litio, Semiconductores, Ferroviaria, Uso de Inteligencia Artificial en Docencia y Recursos Educativos en Ambientes Virtuales de Aprendizaje. Participó en el Diseño del Sistema de Evaluación al Desempeño Docente; diseñador del Diplomado para la Formación de Competencias Docentes; Coordinador del Desarrollo de Competencia Laboral E0772 y de la Integración del Comité de Gestión de Competencias. Socio Fundador de la Universidad de Negocios y Estudios Profesionales del Potosí UNEP; responsable del Diseño Curricular de la Maestría en Ciencias de la Educación y del Modelo Educativo del Centro Universitario de Negocios y Estudios Profesionales CUNEP.



David Noriega Urquidez es Ingeniero en Electrónica con especialidad en Comunicaciones por el Instituto Tecnológico de Culiacán. Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Optoelectrónica por el Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Cuenta con publicaciones indexadas y participaciones en Congresos Nacionales e Internacionales. Fue miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos. En puestos administrativos, fue jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación y Subdirector Académico del Instituto Tecnológico de Culiacán. Actualmente es profesor y Director del Instituto Tecnológico de Mazatlán.



Jorge Luis Camas Anzueto, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte de la SECIHTI. Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG. Ha publicado más de 70 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 22 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 150 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX.



Ramón Díaz de León Zapata es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, cuenta con Maestría en Ciencias de la Computación por el mismo Instituto y con el Doctorado en Ciencias Aplicadas con especialidad en Fotónica por la UASLP. Tiene la distinción de Perfil Deseable ante PRODEP y es miembro del cuerpo académico consolidado “Calidad de la Energía”. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores con nivel I.



Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez, Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó dos estancias Postdoctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Sus investigaciones están dirigidas a la optoelectrónica, a los sensores de fibra óptica, al desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables a múltiples longitudes de onda. Actualmente, es profesor-investigador en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Irving Paul Vargas Cruz, Lic. En Física egresado de la Universidad Veracruzana, curso la maestría en ciencias aplicadas con especialidad en fotónica en el IICO (Instituto de Investigación en Comunicación Óptica), realizo el doctorado en ciencias aplicadas en el instituto CIACYT (Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología), Actualmente pertenece a la academia de ciencias básicas del ITSLP (Instituto Tecnológico de San Luis Potosí), encargado del laboratorio de física del área correspondiente..



Pedro Marcos Velasco Bolom es Doctor en Ciencias de la Ingeniería, especializado en la caracterización de materiales para el desarrollo de sensores ópticos, por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez. Actualmente, se desempeña como posdoctorante investigador en dicho instituto, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de investigación científica y tecnológica. Cuenta con el reconocimiento por el Sistema de Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) nivel-C. Actualmente es miembro del Sistema Estatal de Investigadores (SEI). Su carrera profesional comenzó siendo ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por parte del Instituto Politécnico Nacional, posteriormente es egresado de la Maestría en Ciencia Físicas, durante los cuales ha publicado artículos científicos en revistas de alto impacto, ha participado en congresos nacionales e internacionales en la especialidad de óptica.

Metagenómica de suelos y optomecatrónica: clave para una agricultura sustentable en Chiapas.

Soil metagenomics and optomechatronics: the key to sustainable agriculture in Chiapas.

Víctor Manuel Ruíz Valdiviezo* (1).
Laboratorio de Biología Molecular. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. bioqvic@hotmail.com.

Betsy Anaid Peña Ocaña (2). Departamento de Bioquímica, Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, Mexico City 14080, Mexico, betsy.anaid@gmail.com.

Rony Obed Suchiapa Díaz (3). Laboratorio de Biología Molecular, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, suchiapadiazronyobed@gmail.com.

Josué Alegría Gómez (4). Laboratorio de Biología Molecular, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, josue.ag@tuxtla.tecnm.mx.

Magín González Moscoso (5). Laboratorio de Biología Molecular, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, magingonmos@gmail.com.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 05, 2026; aceptado en octubre 08, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Cuarto Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica 2025.

Resumen.

El presente trabajo de divulgación se centra en la implementación estratégica entre la metagenómica del suelo y la ingeniería optomecatrónica como una base fundamental para enfrentar los retos de la producción agrícola e impacto ambiental en el estado de Chiapas sin afectar a las generaciones futuras. Ante el gran desafío global de alimentar a más de 9,700 millones de personas para el año 2050, la agricultura convencional enfrenta severas limitaciones debido a la pérdida de la fertilidad del suelo, lo que da como resultado la alta dependencia de agroquímicos sintéticos. A través del uso de técnicas de secuenciación masiva de nueva generación (NGS) —como la secuenciación del amplicón (16S rRNA e ITS) y la metagenómica shotgun— se ha logrado caracterizar la diversidad taxonómica y funcional del microbioma rizosférico de los suelos agrícolas de la zona Frailesca del estado de Chiapas. De manera complementaria, el desarrollo e implementación de sensores optomecatrónicos (espectroscopía NIR, fluorescencia, sensores físico-químicos e IoT) y biosensores basados en fibra óptica permiten el monitoreo in situ y en tiempo real de parámetros edáficos críticos. La unión de ambas tecnologías sienta las bases de la Agricultura 4.0/5.0 en la región, optimizando el uso de insumos, promoviendo el biocontrol y restaurando la salud del suelo.

Palabras clave: Agricultura de precisión, microbioma del suelo, optomecatrónica, secuenciación NGS, sustentabilidad edáfica.

Abstract.

This outreach project focuses on the strategic integration of soil metagenomics and optomechatronic engineering as a fundamental basis for addressing the challenges of agricultural production and environmental impact in the state of

Chiapas without harming future generations. Faced with the major global challenge of feeding more than 9,700 million people by the year 2050, conventional agriculture faces severe limitations due to the loss of soil fertility, resulting in a high dependence on synthetic agrochemicals. Through the use of next-generation sequencing (NGS) techniques—such as amplicon sequencing (16S rRNA and ITS) and shotgun metagenomics—we have successfully characterized the taxonomic and functional diversity of the rhizosphere microbiome in agricultural soils of the Frailesca region in the state of Chiapas. Complementarily, the development and implementation of optomechatronic sensors (NIR spectroscopy, fluorescence, physicochemical sensors, and IoT) and fiber-optic-based biosensors enable in situ, real-time monitoring of critical edaphic parameters. The combination of these two technologies lays the foundation for Agriculture 4.0/5.0 in the region, optimizing the use of inputs, promoting biocontrol, and restoring soil health.

Keywords: NGS sequencing, optomechatronics, precision agriculture, soil microbiome, soil sustainability.

1. Descripción de la conferencia.

La población mundial alcanzará aproximadamente los 9, 700 millones de habitantes para el año 2050 de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2025). Este aumento acelerado de la población mundial ha generado preocupación porque plantea una exigencia para producir más alimento con las dificultades que presenta el cambio climático, la degradación de los suelos, y la escasez de agua.

Desde un panorama regional, el estado de Chiapas, tiene una actividad agrícola basada en el autoconsumo y representa uno de los motores socioeconómicos más importantes; sin embargo, enfrenta diversos problemas relacionados al clima y el deterioro de sus suelos que se ven reflejados en los bajos rendimientos de los cultivos agrícolas que son base de la soberanía alimentaria como maíz y frijol.

Durante años, los sistemas agrícolas se han basado en el uso frecuente y excesivo de fertilizantes químicos sintéticos y agroquímicos tóxicos para combatir plagas y enfermedades. Estas prácticas no solo han afectado las propiedades fisicoquímicas y la biodiversidad microbiana de los suelos, sino que también se ha propiciado la lixiviación de algunos contaminantes hacia los mantos acuíferos, que provoca la contaminación ambiental y la salud pública.

Para garantizar la sostenibilidad alimentaria, es necesario evolucionar desde las prácticas tradicionales hacia tecnología emergente como los esquemas de Agricultura 4.0 y 5.0. Esta evolución implica dejar atrás la automatización basada en GPS y la mecanización tradicional para adoptar una plataforma basada en la Internet de las Cosas (IoT), el análisis metagenómico y el monitoreo fisicoquímico continuo, lo que permitirá tomar decisiones precisas.

2. Métodos.

Con la finalidad de establecer una caracterización holística del ecosistema edáfico del estado de Chiapas y posibilitar un diagnóstico temprano de su estado de salud, se implementó una estrategia metodológica multidisciplinaria que articula la biología molecular de alta resolución con la ingeniería de sistemas optoelectrónicos.

2.1. Caracterización Metagenómica de Suelos mediante Secuenciación Masiva

La caracterización metagenómica del microbioma rizosférico de suelos agrícolas del estado de Chiapas, se realizó mediante la Secuenciación de Nueva Generación (NGS). Inicialmente, se realizaron muestreos georreferenciados de suelos agrícolas del municipio de la Concordia, Chiapas. para la extracción de ADN metagenómico. Posterior a la extracción directa de ADN metagenómico de alta pureza, se procedió a realizar la ampliación de las regiones genéticas altamente conservadas mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

En el caso del dominio bacteriano y de arqueas, se amplificó la región hipervariable V1–V4 del gen 16S rRNA, generando amplicones de aproximadamente 660 pares de bases (pb). interno ITS1–ITS4, obteniendo fragmentos de alrededor de 721 pb.

Las librerías genómicas generadas se sometieron a secuenciación masiva paralela en plataformas de alto rendimiento. Las secuencias crudas obtenidas fueron procesadas bioinformáticamente, se eliminaron secuencias quimeras, agrupación en unidades taxonómicas operativas (OTUs) y asignación funcional apoyada en bases de datos especializadas como KEGG, COG y CAZy (Bolyen et al., 2019). Asimismo, la estructura y diversidad de las comunidades se evaluó rigurosamente mediante métricas de diversidad alfa (tales como el índice de Shannon) y diversidad beta (Dixon, 2003).

2.2. Monitoreo Optomecatrónico y Arquitectura de Sensores

En forma paralela, la evaluación fisicoquímica e hídrica del suelo se articuló mediante el despliegue de nodos sensoriales integrados a redes IoT. El sistema cuenta con sensores de humedad basados en reflectometría de dominio temporal (TDR) y sensores capacitivos, combinados con electrodos para la medición continua de pH y Conductividad Eléctrica (CE). Asimismo, la emisión de gases de efecto invernadero y gases traza (como dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) se monitorea in situ mediante espectroscopía infrarroja no dispersiva (NDIR) y diodos láser sintonizables (TDLS).

Para la caracterización del cultivo y la materia orgánica edáfica, se integraron instrumentos de espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIR) y sistemas de fluorometría vegetal, complementados con cámaras hiperespectrales instaladas en vehículos aéreos no tripulados (VANTs), posibilitando la detección remota y no destructiva del estrés hídrico y nutrimental a escala de parcela.

3. Desarrollo.

3.1 Análisis metagenómico.

A partir de los perfiles taxonómicos se identificaron los principales géneros bacterianos presentes en los suelos analizados. La información obtenida se representó mediante un mapa de calor (*heatmap*), en el que la intensidad del color refleja la abundancia relativa de cada género bacteriano entre las muestras (figura 1).

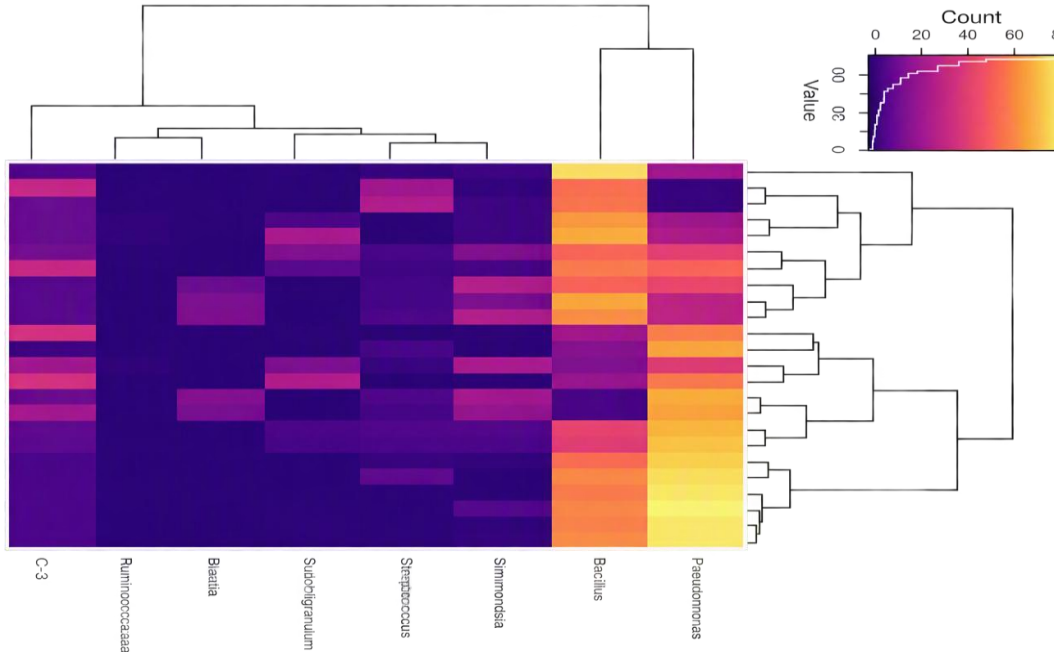


Figura 1. Heatmap representativo de los géneros de bacterias más abundantes en metagenomas de suelo. En color purpura se muestran los microorganismos menos abundantes y en color amarillo corresponde los más abundantes, el gradiente de color indica la sucesión ecológica en cada tratamiento y día analizado.

En estudios realizados en suelos agrícolas del estado de Chiapas han demostrado que las prácticas de manejo del suelo, incluyendo la aplicación de diferentes fuentes fosfatadas, vermicomposta y la incorporación de rastrojo vegetal, influyen significativamente en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del agroecosistema (Velázquez-Ríos et al. 2026). Además, los estudios metagenómicos han revelado que modificaciones en la composición y diversidad de las comunidades microbianas, evidenciando que los microorganismos responden de manera diferenciada a las estrategias de fertilización y aporte de materia orgánica. Estos resultados destacan la importancia de implementar prácticas agrícolas sustentables que favorezcan la salud del suelo, promueven ciclos biogeoquímicos más eficientes y contribuyan a mantener la productividad de los sistemas agrícolas de Chiapas.

3.2. Perspectivas: hacia una plataforma integral de monitoreo agrícola.

Para caracterizar de manera integral los agroecosistemas es necesario fusionar datos de tipo microbiológico, fisicoquímico y ambiental. En este escenario, la metagenómica posibilita la descripción del potencial funcional y de la composición taxonómica de las comunidades microbianas presentes en el suelo. Esto incluye genes que tienen que ver con el ciclado de nutrientes, la promoción del crecimiento de las plantas y la reacción ante situaciones estresantes (Wani et al., 2025). Además, el monitoreo de la humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica, radiación, humedad relativa y CO_2 mediante sensores posibilita llevar un registro permanente de las condiciones que afectan el suelo y el crecimiento de los cultivos (Prakash et al., 2023). El uso de estos dispositivos en estructuras que se basan en el Internet de las cosas (IoT) permite obtener, transferir y sincronizar datos provenientes del suelo y del entorno de cultivo, especialmente en sistemas resguardados como los invernaderos. Esta integración permite asociar modificaciones en las condiciones fisicoquímicas con alteraciones en la función y estructura del microbioma y, más adelante, con marcadores que reflejan el estado fisiológico de las plantas. Desde el enfoque de la agricultura de precisión, la fusión entre el análisis computacional, la metagenómica y el sensado optomecatrónico podría favorecer la creación de plataformas multiparamétricas enfocadas en emplear los nutrientes y el agua de manera eficaz, detectar tempranamente situaciones de estrés y tomar decisiones fundamentadas en información.

Conclusiones.

La convergencia estratégica entre la metagenómica de suelos y la ingeniería optomecatrónica representa un paradigma altamente efectivo para la agricultura del siglo XXI. Esta alianza permite diagnosticar con precisión la salud edáfica, proteger la biodiversidad microbiana nativa de Chiapas y optimizar el uso de los recursos naturales.

El conocimiento profundo del microbioma autóctono abre la puerta al desarrollo de biofertilizantes a medida y al fortalecimiento de prácticas agroecológicas sustentables. Al mismo tiempo, la incorporación de biosensores y tecnologías ópticas en tiempo real promueve el despliegue efectivo de la Agricultura 5.0, consolidando un modelo productivo resiliente, económicamente viable y ambientalmente responsable para las comunidades agrícolas de la región.

Créditos.

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por el respaldo proporcionado a través de sus programas de posgrado (Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología). De igual manera, se reconoce el constante apoyo del Cuerpo Académico de Biotecnología Sustentable para el Desarrollo Sustentable del Estado de Chiapas y de las instituciones participantes en el Cuarto Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica Internacional.

Referencias bibliográficas.

Bolyen, E., Rideout, J. R., Dillon, M. R., Bokulich, N. A., Abnet, C. C., Al-Ghalith, G. A., ... & Caporaso, J. G.(2019). *Reproducible, interactive, scalable and exten-sible microbiome data science using QIIME 2. Naturebiotechnology,* 37(8), 852–857. https://doi.org/10.1038/s41587-019-0209-9.

Dixon, P. (2003). *VEGAN, a package of R functions for com-munity ecology.* Journal of Vegetation Science, 14(6),927–930. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02228.x.

Prakash, C., Singh, L. P., Gupta, A., & Lohan, S. K. (2023). *Advancements in smart farming: A comprehensive review of IoT, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation.* Sensors and Actuators A: Physical, 362, 114605. https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114605.

Velázquez-Ríos, I. O., Rosabal-Ayan, L., Guevara-Hernández, F., La O-Arias, M. A., & Ruíz-Valdiviezo, V. M. (2026). *Diversity of fungal and bacterial communities in bioinputs from Chiapas Mountains and soils from maize agroecosystems.* Sustainability, 18(14), 7303. https://doi.org/10.3390/su18147303.

Wani, A. K., Qadir, F., Elboughdiri, N., Rahayu, F., Saefudin, Pranowo, D., Martasari, C., Kosmiatin, M., Suhara, C., Sudaryono, T., Prayogo, Y., Yadav, K. K., Muzammil, K., Eltayeb, L. B., Alreshidi, M. A., & Singh, R. (2025). *Metagenomics and plant-microbe symbioses: Microbial community dynamics, functional roles in carbon sequestration, nitrogen transformation, sulfur and phosphorus mobilization for sustainable soil health*. Biotechnology Advances, 82, 108580. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108580.

Información de los autores.



Víctor Manuel Ruíz Valdiviezo es Doctor en Biotecnología por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Es profesor e investigador del Tecnológico Nacional de México, adscrito al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, Nivel II. Su trayectoria comprende biología molecular de microorganismos, interacción planta-suelo-microorganismo, bioquímica, fisiología vegetal y biotecnología agrícola. Cuenta con una amplia producción científica y experiencia en formación de investigadores.



Betsy Anaid Peña Ocaña es Doctora en Ciencias por el Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez. Es Investigadora en Ciencias Médicas en el Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez y profesora en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Es miembro del del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores en el Nivel I. Su investigación comprende los microbiomas ambientales y el microbiota gastrointestinal. Cuenta con producción científica innovadora y participa activamente en la formación de recursos humanos especializado.



Rony Obed Suchiapa Díaz, Ingeniero Bioquímico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Cuenta con Maestría en Ciencias en Ingenieria Bioquimica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, actualmente realiza el Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnolólogía, en dicho instituto. Su investigacion se centra en la evaluación de las condiciones de cultivo sobre la producción de exopolisacáridos (EPS) y lipopéptidos (LPS) en bacterias extremofilas y como estas condiciones de cultivo afectan las caracteristicas estructurales y actividades biotecnologicas de los EPS y LPS.



Josué Alegría Gómez es Maestro en Ciencias en Ingeniería Bioquímica e Ingeniero Agroindustrial, y actual estudiante del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología. Se desempeña como docente en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez. Su investigación se centra en la biotecnología ambiental, biología molecular y bioinformática, estudiando ecosistemas acuáticos, cultivos anaerobios y comunidades microbianas mediante herramientas bioinformáticas y biología molecular. Es integrante del Sistema Estatal de Investigadores de Chiapas (Joven Investigador).



Magín González Moscoso es Doctor en Ciencias en Agricultura Protegida por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Actualmente es posdoctorante de la SECIHTI en el Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez, donde desarrolla actividades de investigación relacionadas con la agricultura sostenible, conservación de semillas nativas, nanotecnología y producción agroalimentaria. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), de la Red Arsenic Research and Action Network IPICyT-Heriot-Watt University y del Grupo de Investigación Nanociencias y Nanotecnología del Sureste.

Uso y aplicación de la luz linealmente polarizada enfocada en la ciencia y vida cotidiana.

Use and application of linearly polarized light focused on science and everyday life.

Alfredo Rossel Morales Navarro* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
moralesnavarroalfredo@gmail.com.

Rubén Grajales Coutiño (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
ruben.gc@tuxtla.tecnm.mx**.**

Jorge Luis Camas Anzueto (3). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Sabino Velázquez Trujillo (4). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
sabino.vt@tuxtla.tencm.mx.

Gustavo Emilio Rojo Velázquez (5). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Piedras Negras.

Alinne Estefanía Espinosa Lozoya (6). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
alineestefania29@gmail.com.

Elin Enrique Aguilar Molina (7). Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez,
elin.am@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 03, 2026; aceptado en octubre 10, 2026.
Conferencia presentada en el Segundo Encuentro Nacional Estudiantil en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2024.

Resumen.

La luz linealmente polarizada es un fenómeno óptico presente en diversas situaciones de la vida cotidiana y en aplicaciones científicas y tecnológicas. En este artículo se presentan de manera introductoria los principios fundamentales de la polarización de la luz, sus formas de obtención y algunas de sus principales aplicaciones tanto en dispositivos de uso cotidiano y en áreas científicas. Finalmente, se presenta un sistema optomecatrónico como ejemplo de aplicación experimental, mediante el cual se obtiene la curva característica de la ley de Malus y se muestra cómo el control de la polarización permite estudiar experimentalmente la interacción de la luz con diferentes elementos ópticos.

Palabras clave: Aplicaciones ópticas, ley de Malus, polarización de la luz, sistema optomecatrónico.

Abstract.

Linearly polarized light is an optical phenomenon present in various aspects of everyday life and in scientific and technological applications. This article provides an introductory overview of the fundamental principles of light polarization, the methods used to produce it, and some of its main applications in everyday devices and scientific fields. Finally, an optomechatronic system is presented as an example of an experimental application, through which the characteristic curve of Malus' law is obtained, demonstrating how polarization control can be used to experimentally study the interaction of light with different optical elements.

Keywords: Light polarization, Malus' law, optical applications, optomechatronic system.

1. Descripción de la conferencia.

La óptica es una rama de la física encargada del estudio de la luz, sus propiedades, comportamiento, interacción con la materia y los efectos que produce sobre diferentes materiales. Debido a estas características, el estudio de la luz se relaciona con diversas áreas del conocimiento, entre ellas la óptica, la química, física cuántica, y otras disciplinas científicas en las que la interacción entre la radiación y la materia permite obtener información sobre diferentes fenómenos (Castellano et al., 2015).

Desde la formulación de las ecuaciones de Maxwell en el siglo XIX, la luz puede describirse como una onda electromagnética constituida por campos eléctricos $\vec{E}$ y magnéticos $\vec{B}$ que se encuentran relacionados entre sí y se propagan en el espacio como se observa en la figura 1.

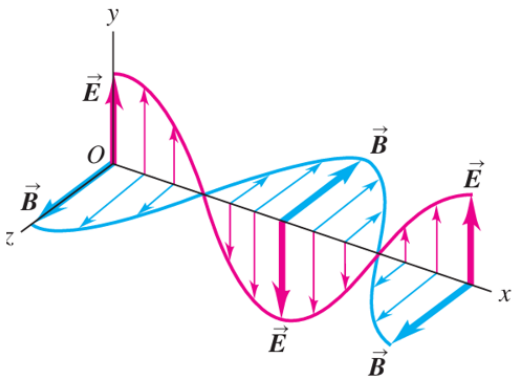


Figura 1. Onda electromagnética sinusoidal. Fuente: Freedman y Zemansky (2009).

Matemáticamente, la componente del vector del campo eléctrico se describe mediante la ecuación (1):

$$\vec{E}(x,t) = \hat{j}\,E_0 \cos(kx - \omega t + \phi), \tag{1}$$

donde E_0 representa la amplitud del campo eléctrico, k es el número de onda, ω la frecuencia angular y ϕ la fase inicial. Una de las propiedades físicas de la luz es que puede ser polarizada. Siendo la luz un tipo de radiación electromagnética, posee tanto campo eléctrico como campo magnético; es precisamente su campo eléctrico el que produce el fenómeno de la polarización. (Rodríguez J., 2018). En la luz natural, los planos de oscilación del campo eléctrico varían de forma aleatoria y constante en el tiempo. Decimos entonces que es luz no polarizada. En cambio, cuando logramos que el campo eléctrico oscile en un único plano fijo a lo largo del tiempo, obtenemos luz linealmente polarizada. La luz polarizada puede obtenerse mediante diferentes procesos, entre los que se encuentran la transmisión, la reflexión y la dispersión (Kliger, D. et al., 2012).

Polarización por transmisión.

La polarización por transmisión ocurre cuando un haz de luz atraviesa un material que tiene una estructura molecular orientada selectivamente en una sola dirección, como ocurre con los filtros *Polaroid*. Cuando una fuente de luz inicialmente no polarizada atraviesa el filtro, este absorbe y bloquea completamente aquellas componentes del campo eléctrico que oscilan de forma paralela a su estructura molecular del polímero, permitiendo transmitir únicamente la componente perpendicular. Como resultado, la luz emergente queda convertida en luz linealmente polarizada a lo largo del eje del filtro como se observa en la figura 2.

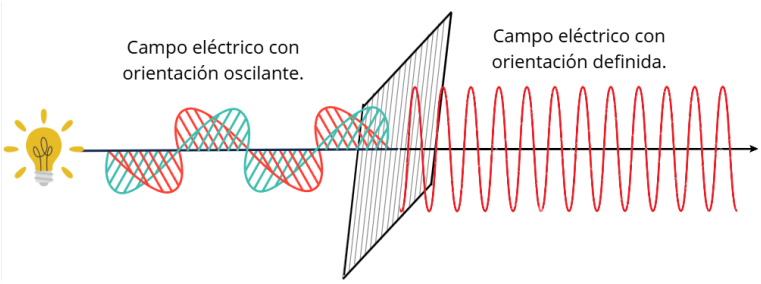


Figura 2. Polarización lineal de la luz por medio de filtro polarizador lineal.

Polarización por reflexión.

Cuando una onda luminosa incide en una superficie lisa que separa dos materiales transparentes, la onda es, en general, reflejada parcialmente y también refractada parcialmente hacia el segundo material, como se ilustra en la figura 3.

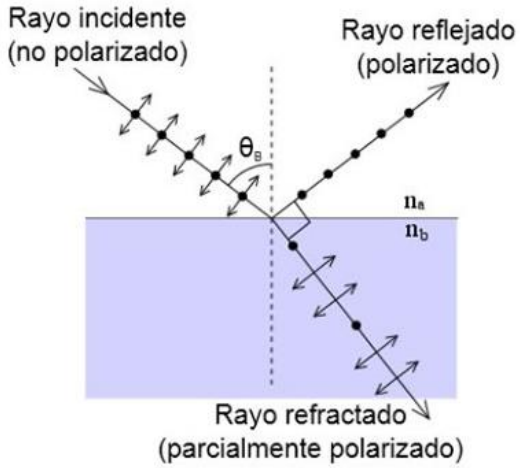


Figura 3. Una onda plana es en parte reflejada y en parte refractada en la frontera entre dos medios. Fuente: Freedman y Zemansky (2009).

Bajo una condición particular conocida como ángulo de Brewster, el rayo reflejado y el rayo refractado forman un ángulo exacto de $\mathbf{90}^{\circ}$ entre sí. En esta condición, la luz reflejada y queda completamente polarizada linealmente. El ángulo de Brewster puede determinarse mediante la relación que se muestra en la ecuación (2):

$$\tan(\boldsymbol{\theta_B}) = \frac{\boldsymbol{n_b}}{\boldsymbol{n_a}}, \qquad (2)$$

donde $\boldsymbol{\theta_B}$ es el ángulo de Brewster, $\boldsymbol{n_a}$ y $\boldsymbol{n_b}$ representan los índices de refracción del primer y segundo medio. De esta manera, la interacción de la luz con la superficie no solo modifica su dirección de propagación, sino que también puede modificar su estado de polarización.

Polarización por dispersión.

La polarización por dispersión ocurre cuando la luz interactúa con partículas o moléculas presentes en un medio y es desviada en diferentes direcciones. Este fenómeno se observa en la figura 4, donde al incidir un haz de luz no polarizada en las moléculas de la atmósfera, la luz es reemitida en todas las direcciones. Cuando esta luz dispersada se observa en un ángulo perpendicular respecto a la trayectoria del rayo original, el campo eléctrico oscila en un solo plano, resultando en luz completamente polarizada linealmente.

Este fenómeno demuestra que la polarización no requiere necesariamente el uso de un filtro o dispositivo óptico, sino que puede producirse de manera natural como consecuencia de la interacción entre la luz y la materia.

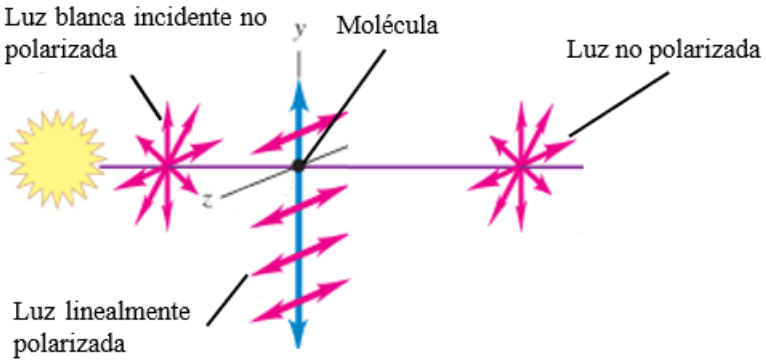


Figura 4. Polarización por dispersión por medio de las moléculas del aire. Adaptado de Freedman y Zemansky (2009).

La polarización puede producirse mediante diferentes interacciones entre la luz y la materia. Ya sea al atravesar un material, reflejarse sobre una superficie o dispersarse en un medio, la luz puede adquirir una dirección preferente de oscilación que puede ser aprovechada para controlar y estudiar propiedades ópticas. Esta característica ha permitido desarrollar numerosas aplicaciones, algunas presentes en objetos de uso cotidiano y otras empleadas como herramientas de investigación científica.

2. Aplicaciones de la luz polarizada.

El uso de la luz polarizada se encuentra en diferentes ámbitos, por ejemplo, en los filtros polarizadores, que forman parte de aplicaciones como en las gafas de sol, las pantallas LCD y la fotografía como se observa en la figura 5. Las gafas polarizadas son aquellas que cuentan con un filtro especial capaz de reducir la intensidad de luz que llegan a los ojos y bloquear reflejos ocasionados por superficies como el agua, el metal o en el cristal. Su función principal es reducir los reflejos y mejorar la claridad visual. Las pantallas LCD utilizan filtros polarizadores para controlar el paso de la luz a través de la pantalla, haciendo que las imágenes en la pantalla sean visibles y nítidas. Controlan el contraste de las imágenes generadas y modula el brillo de los pixeles. El uso de los filtros en la fotografía ayuda a evitar los reflejos no deseados y destellos que provienen de la luz del sol, el contraste y la saturación en la toma de fotografías.

En el área científica la luz polarizada se utiliza en campos como la espectroscopia, la microscopía y la investigación de materiales, debido a que permite obtener información que no siempre puede observarse mediante una fuente de luz convencional. Al interactuar con una muestra, la luz puede experimentar cambios en su intensidad, dirección de propagación o estado de polarización, dependiendo de las características físicas y químicas del material. El análisis de estas modificaciones permite estudiar con mayor detalle la estructura y las propiedades de diferentes sustancias. En

técnicas espectroscópicas es posible analizar la respuesta de una muestra ante diferentes longitudes de onda, mientras que en microscopía con luz polarizada pueden identificarse características estructurales de determinados materiales. De esta manera, el análisis de la luz transmitida, absorbida, reflejada o dispersada por una muestra proporciona información relacionada con su composición, estructura y propiedades, como puede observarse en la figura 6.



Figura 5. Diferentes aplicaciones de los filtros polarizadores, en a) uso en fotografía para atenuar reflejos, en b) uso en pantallas LCD para controlar la transmisión de luz y permitir la visualización de imágenes, y c) uso en gafas de sol para reducir la intensidad de la luz y reflejos.



Figura 6. Diferentes fenómenos ópticos que genera una muestra al incidirle un haz de luz. Fuente: Blogspot.com

Para aprovechar esta información no basta con producir luz polarizada, también es necesario poder medir cómo cambia la luz cuando se modifica su orientación. Una de las configuraciones ópticas más sencillas para realizar este tipo de análisis consiste en colocar dos elementos polarizadores de manera consecutiva: un polarizador y un analizador.

3. Sistema polarizador-analizador y la ley de Malus.

Para observar ese cambio de la polarización de la luz en espectroscopía se utiliza arreglo experimental basado en la ley de Malus, en el cual se utilizó dos polarizadores lineales de luz denominados como polarizador y analizador (Önder et al., 2021). Este arreglo se observa en la figura 7, utiliza dos filtros polarizadores lineales de luz de manera consecutiva, el primer filtro se conoce como "Polarizador", este recibe la luz no polarizada con una intensidad $\boldsymbol{I}$ y la convierte en luz linealmente polarizada con una potencia $\boldsymbol{I_0}$. El segundo filtro se denomina como "Analizador" y tiene la capacidad de poder rotar con un ángulo $\boldsymbol{\theta}$ con respecto al eje del primer polarizador. En 1808, el físico francés Étienne-Louis Malus descubrió que la intensidad $\boldsymbol{I}$ de la luz que emerge del analizador varía directamente en función del ángulo entre los dos ejes de transmisión. Este comportamiento se demuestra en la Ley de Malus (Hecht E., 2012):

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \tag{3}$$

donde I_0 representa la irradiancia de la fuente óptica, I es la irradiancia medida y θ es el ángulo generado entre el polarizador y analizador.

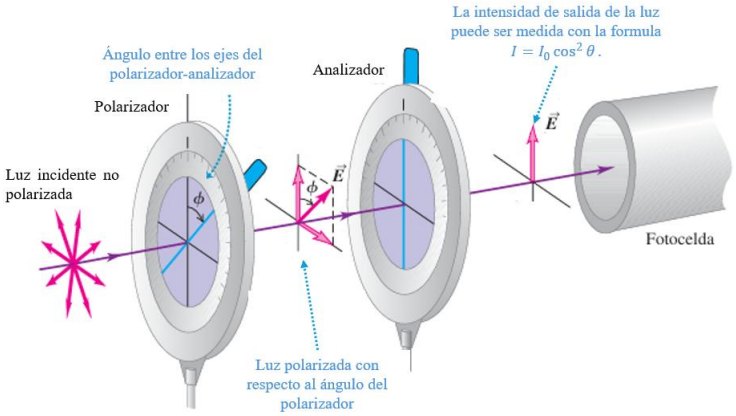


Figura 7. Demostración de la transmisión de luz del sistema polarizador-analizador. Adaptado de Freedman y Zemansky (2009).

Una de sus aplicaciones de este sistema es la medición de la rotación del plano de polarización, fenómeno que puede presentarse cuando una sustancia ópticamente activa interactúa con luz linealmente polarizada (Vaccaro P., 2012). Esta propiedad resulta de interés en diferentes áreas científicas y tecnológicas como en la polarimetría, el estudio de alimentos, productos farmacéuticos y caracterización de materiales.

Para medir esta rotación óptica, primero se establece una referencia mediante el sistema polarizador–analizador sin colocar la muestra en la trayectoria de la luz. Posteriormente, se introduce el material entre ambos elementos ópticos. Si la muestra produce una rotación del plano de polarización, la posición angular en la que el analizador permite obtener una determinada condición de intensidad cambiará con respecto a la posición de referencia. La diferencia entre ambas posiciones angulares permite determinar la rotación óptica producida por la muestra. Sin embargo, las propiedades ópticas de algunos materiales no permanecen constantes ante cambios en las condiciones de operación. La temperatura es una de las variables que puede modificar la interacción entre la luz y la materia y, en consecuencia, afectar propiedades relacionadas con la actividad óptica (Winsemius et al., 1976).

4. Sistema optomecatrónico para la medición de la rotación óptica.

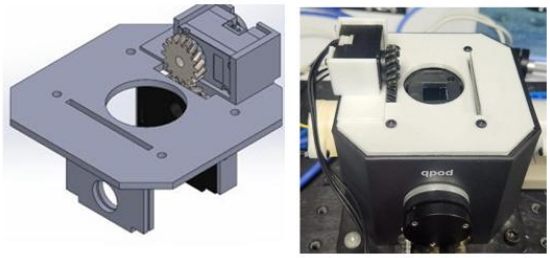
A partir de esta problemática se realizó un sistema polarizador–analizador dentro de un controlador de temperatura. El sistema permite mantener la muestra bajo una condición térmica determinada mientras se analiza la luz polarizada linealmente que atraviesa el material y determinar la rotación del plano de polarización producida por la muestra.

Los componentes utilizados para llevar a cabo el dispositivo son las siguientes:

- Servo motor Dynamixel XL330-M288T.
- Sistema de engranajes
- Controlador de temperatura Qpod.
- Fotodetector con un rango espectral de 200-1100 nm
- Medidor de potencia Thorlabs PM320E.
- Computadora como adquisición de datos

Diseño del mecanismo polarizador-analizador dentro del controlador de temperatura.

Se utilizó el software CAD SolidWorks para diseñar el sistema polarizador-analizador dentro del Qpod, la rotación del filtro polarizador se realiza por medio de un sistema de engranajes helicoidales operados por un servomotor Dynamixel XL330-M288T. En el otro extremo del controlador se colocó una simple ranura con la capacidad de almacenar una película polarizadora linealmente de manera estática, todo este conjunto esta sujetado por una base plana que realiza la función de una "tapa" para evitar la entrada de luz no deseada como se observa en la figura 8 en a) se presenta el diseño CAD y en b) de manera física fabricado en impresión 3D y ensamblado en el controlador de temperatura.



a) b)

Figura 8. Dispositivo optomecatrónico en a) diseño y ensamble en software SolidWorks y en b) impresión y ensamble en controlador de temperatura.

El esquema de funcionamiento se observa en la figura 9, donde se especifican los principales componentes utilizados para la implementación del sistema optomecatrónico. Una de sus principales características es su capacidad de modulación y adaptación, ya que permite incorporar diferentes dispositivos de medición de acuerdo con el estudio que se desea realizar. Entre estos dispositivos se encuentran un medidor de potencia óptica y un espectrómetro, los cuales permiten ampliar las posibilidades de caracterización de las muestras, permitiendo realizar estudios de absorbancia, rotación óptica, potencia óptica, fluorescencia y medición del espectro electromagnético.

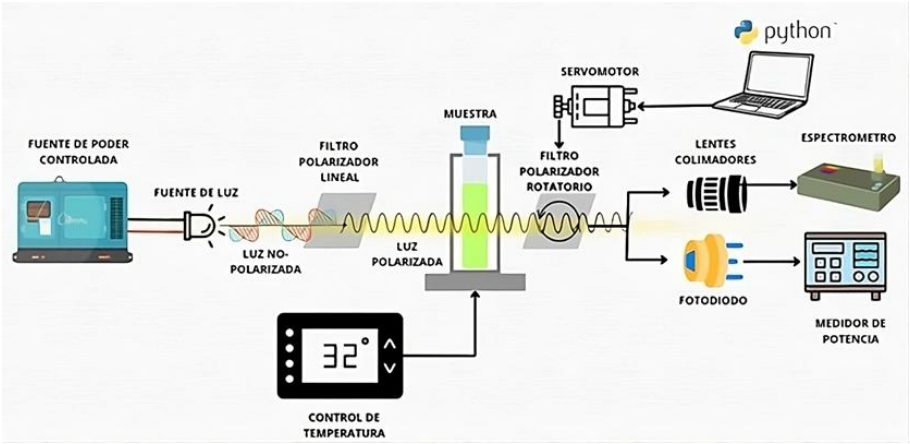


Figura 9. Configuración experimental del sistema optomecatrónico polarizador–analizador con control de temperatura.

Una de las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del sistema polarizador–analizador consiste en obtener experimentalmente la curva característica de la ley de Malus. Para ello, se modifica de manera controlada el ángulo entre el polarizador y el analizador, mientras se registra la intensidad de la luz transmitida para cada posición angular. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 10, donde se observa que la potencia máxima de $1.26\ x\ 10^{-5}\ W$ se alcanza en la posición angular de 273.692574°. Esta condición corresponde a la alineación de los ejes de transmisión de ambos filtros polarizadores, permitiendo la máxima transmisión de luz. De acuerdo con la ley de Malus, cuando los

ejes de transmisión de los polarizadores se encuentran perpendiculares entre sí, es decir, a 90° con respecto al otro, la transmisión de luz es mínima, en este caso debería presentarse en 183.692574° que corresponde a una diferencia angular de 90°. Como se observa en la figura 10, el mínimo de transmisión se presenta aproximadamente en dicha posición, coincidiendo con el comportamiento esperado de la ley de Malus.

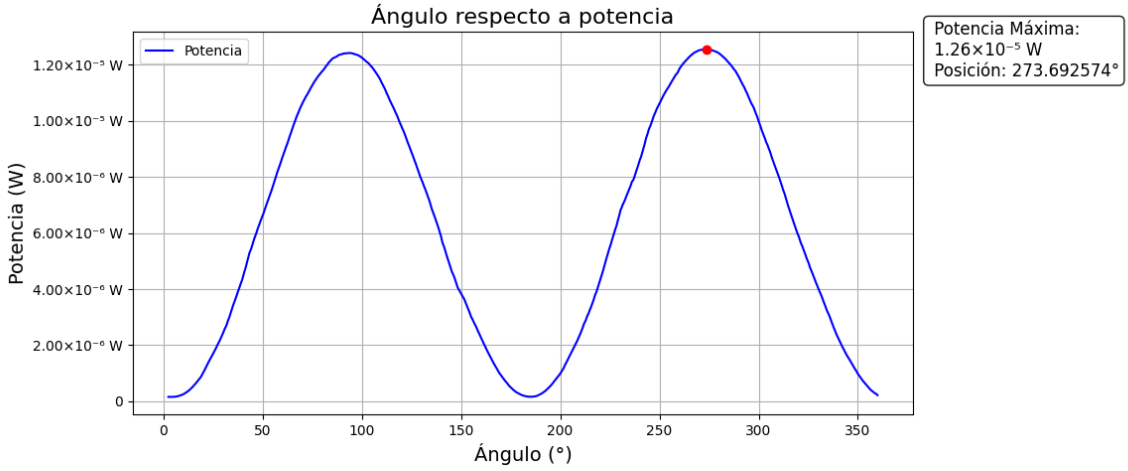


Figura 10. Validación experimental de la ley de Malus mediante el sistema polarizador–analizador.

Conclusiones.

La luz linealmente polarizada es un fenómeno óptico que puede pasar desapercibido, pero está presente en numerosas aplicaciones desde el uso diario con dispositivos como pantallas y lentes, hasta técnicas científicas empleadas para estudiar las propiedades de diferentes materiales. Comprender su comportamiento permite reconocer cómo la orientación del campo eléctrico de la luz puede ser controlada, modificada y analizada mediante diferentes elementos ópticos.

A través de los principios de polarización es posible comprender cómo la luz interactúa con diferentes medios y cómo estos fenómenos pueden aprovecharse para obtener información sobre los materiales. En este contexto, el sistema optomecatrónico polarizador–analizador presentado constituye un ejemplo de la aplicación experimental de estos principios, al permitir controlar la orientación de la polarización y observar la variación de la potencia óptica transmitida. La obtención de la curva característica de la ley de Malus permitió demostrar experimentalmente este comportamiento.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento de los proyectos 25694.26-P y 25738.26-P, así como a la SECIHTI por el apoyo otorgado a través de la beca de doctorado.

Referencias bibliográficas.

Anderson, J., Gillen, C., Wright, J., Adams, C. S., & Hughes, I. G. (2020). *Optical rotation of white light. American Journal of Physics*, 88(3), 247-251.

Cantellano, M. A. G., & Zetina, L. M. M. (2015). *La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI*. Latin-American Journal of Physics Education, 9(4), 13.

Freedman, Y., & Zemansky, S. (2009). *Física universitaria*. Editorial. Prentice Hall. México. Decimosegunda edición.

Gu, C., Jia, A. B., Zhang, Y. M., & Zhang, S. X. A. (2022). *Emerging electrochromic materials and devices for future displays*. Chemical Reviews, 122(18), 14679. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c01055.

Hecht, E. (1998). *Optics* (3.ª ed.). Addison-Wesley.

Kliger, D. S., & Lewis, J. W. (2012). *Polarized light in optics and spectroscopy*. Elsevier.

Obstinados navegantes en océanos de incertidumbre. (2016). *Al fondo de la materia, a la derecha del arco iris: sincrotrones - 2*. Blogspot. blogspot.com

Önder, E. B., Önder, F., & Oğur, M. (2021). *An arduino based experiment to prove and teach malus'law*. Mühendislik bilimleri ve tasarım dergisi, 9(3), 833-842. https://doi.org/10.21923/jesd.874073.

Rodríguez, J. M. (2018). Polarización de la luz: conceptos básicos y aplicaciones en astrofísica. Revista Brasileira de Ensino de Física, 40(4), e4310. [3] E. Brukner, C., & Zeilinger, A. (1999). Malus' law and quantum information. acta physica slovaca, 49, 647-652. https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0024.

Vaccaro, P. H. (2012). *Optical rotation and intrinsic optical activity*. Comprehensive chiroptical spectroscopy, 1, 275 323. https://doi.org/10.1002/9781118120187.

Winsemius, P., Van Kampen, F. F., Lengkeek, H. P., & Van Went, C. G. (1976). *Temperature dependence of the optical properties of Au, Ag and Cu*. Journal of Physics F: Metal Physics, 6(8), 1583-1606. https://doi.org/10.1088/0305-4608/6/8/017.

Información de los autores.



Alfredo Rossel Morales Navarro es ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Politécnica de Chiapas y Maestro en ciencias de la ingeniería mecatrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla. Entre sus áreas de interés se encuentran la polarización de la luz, la medición de la rotación óptica y la caracterización experimental de materiales mediante técnicas ópticas. Su trabajo de investigación incluye el desarrollo de un sistema polarizador–analizador automatizado para el estudio experimental y medición de cambios en el plano de polarización de la luz al atravesar diferentes materiales. Actualmente se encuentra estudiando un Doctorado en Ciencias en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería Electrónica por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez, Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó dos estancias Postdoctorales en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I. Sus investigaciones están dirigidas a la optoelectrónica, a los sensores de fibra óptica, al desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables a múltiples longitudes de onda. Actualmente, es profesor-investigador en el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez.



Jorge Luis Camas Anzueto es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte de la SECIHTI. Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG. Ha publicado más de 60 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 12 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 150 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX



Sabino Velázquez Trujillo es Ingeniero Industrial en Producción por el Instituto Tecnológico de Tuxtla, Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba y Doctor en Ciencias en Ingeniería, con especialidad en Procesos de Manufactura, por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Su trayectoria académica y de investigación se ha desarrollado principalmente en las áreas de optimización y desarrollo de modelos de planeación. Es miembro del Cuerpo Académico de Ingeniería Industrial ITTUXG-CA-6, enfocado en el mejoramiento de procesos, y del grupo de investigación en Optimización de Procesos. Asimismo, ha participado en actividades relacionadas con la evaluación, innovación y transferencia tecnológica. Su trabajo incluye investigaciones sobre manufactura esbelta, logística, programación lineal, confiabilidad y optimización de procesos industriales, con publicaciones en congresos internacionales de investigación.



Gustavo Emilio Rojo Velázquez es académico y directivo del Tecnológico Nacional de México. Es egresado del Instituto Tecnológico de Piedras Negras, donde cursó Ingeniería Industrial en Electrónica entre 1990 y 1994. Posteriormente obtuvo el grado de Maestro en Ciencias y el Doctorado en Ciencias en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE); asimismo, realizó estudios de Doctorado en Políticas Educativas. Su trayectoria dentro del TecNM incluye más de dos décadas de actividad académica y de gestión; fue docente y posteriormente subdirector Académico del Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo. Desde febrero de 2023 se desempeña como director del Instituto Tecnológico de Piedras Negras, siendo el primer egresado de esa institución en asumir su dirección. Durante su gestión ha participado en acciones de vinculación académica e internacional, entre ellas la colaboración con Sul Ross State University International, orientada a ampliar las oportunidades académicas de los estudiantes.



Alinne Estefania Espinosa Lozoya es Ingeniera en Electrónica egresada del Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla Gutiérrez, y estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecatrónica. Su trabajo se enfoca en la caracterización óptica de materiales funcionales, particularmente polímeros conductores como PEDOT:PSS, mediante técnicas de espectroscopía UV-Vis y análisis de interacción luz-materia. Cuenta con experiencia en instrumentación, automatización y adquisición de datos experimentales. Sus áreas de interés incluyen la optoelectrónica, fotónica aplicada, materiales conductores transparentes y el desarrollo de tecnologías basadas en materiales funcionales para dispositivos optoelectrónicos.



Elin Enrique Aguilar Molina es Licenciado en Ciencias de la Educación, tiene la Maestría en Ciencias de la Educación. Actualmente, es Profesor de asignatura en el Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Tecnología de diseño asistido por computadora para el desarrollo de dispositivos semiconductores con aplicaciones en emisión y detección de luz ultravioleta.

Computer-aided design technology for the development of semiconductor devices with applications in ultraviolet light emission and detection.

Horacio Irán Solís Cisneros* (1).
Ingeniería en Tecnologías de la Información e Innovación Digital.
hsolis@ids.upchiapas.edu.mx.

Rubén Martínez Revuelta (2). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
rmartinez@ia.upchiapas.edu.mx.

Carlos Alberto Megchum Ruedas (3). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
D13270868@tuxtla.tecnm.mx.

Marcoantonio Ramírez Morales (4). Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Politécnica de Chiapas,
mramirez@im.upchiapas.edu.mx.

Pedro Marcos Velasco Bolom (5). Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez,
D09270506@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 10, 2026; aceptado en octubre 01, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Segundo Encuentro Nacional Estudiantil en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2024.

Resumen.

La detección de radiación ultravioleta exige dispositivos cuya respuesta eléctrica suele probarse solo después de fabricar cada variante de espesor, dopaje o contactos. Este artículo describe como ejes principales un fotodetector ciego al sol de óxido de galio (Ga_2O_3), material de banda ultra ancha con absorción mayor que $10^5\ cm^{-1}$ en esa franja, y enlaza la longitud de onda de interés en el UVC cerca de 210 nm, donde la energía del fotón cumple $E = hc/\lambda$. El método es el diseño asistido por computadora de dispositivos (TCAD), con Silvaco ATLAS para predecir curvas bajo geometría y dopaje declarados, complementado cuando hace falta con DFT a escala de material. En geometría interdigital, reducir el espacio entre electrodos aumenta la corriente y la responsividad bajo luz, mientras que una separación mayor reduce la corriente en oscuridad. En una heteroestructura NiO/Ga_2O_3, fabricar, medir curvas I-V y C-V, calibrar el modelo y reoptimizar mejoró la respuesta fotónica un 4% frente al punto de partida; cuando predicción y medida no coinciden, hipótesis como vacantes de oxígeno entran al modelo. Una predicción no sustituye a la pieza. Diseñar, aquí, significa formular una predicción, contrastarla con la medida y decidir qué cambiar antes de gastar otra ronda de proceso.

Palabras clave: Diseño asistido, fotodetector, óxido de galio, TCAD, ultravioleta.

Abstract.

Ultraviolet detection requires devices whose electrical response is often tested only after fabricating each variant of thickness, doping, or contacts. This article follows a gallium oxide ($\beta - Ga_2O_3$) solar-blind photodetector, an ultrawide-bandgap material with absorption above $10^5\ cm^{-1}$ in that band, and anchors the wavelength of interest near 210 nm in the UVC, where photon energy satisfies $E = hc/\lambda$. The method is technology computer-aided design (TCAD) with Silvaco ATLAS to predict curves under declared geometry and doping, complemented when needed by DFT at the material scale. In an interdigital geometry, reducing electrode spacing increases current and responsivity under illumination, while larger spacing reduces dark current. For a NiO/Ga_2O_3 heterostructure, fabricating, measuring I-V and C-V curves, calibrating the model, and re-optimizing improved the photonic response by 4% relative to the starting point; when prediction and measurement disagree, hypotheses such as oxygen vacancies enter the model. A prediction does not replace the fabricated device. Designing here means stating a prediction, confronting it with measurement, and deciding what to change before spending another process round.

Keywords: Computer-aided design, gallium oxide, photodetector, TCAD, ultraviolet.

1. ¿Podemos diseñar un detector ultravioleta antes de fabricarlo?

Fabricar un detector de luz ultravioleta no es un ensayo barato. Cada cambio de espesor, de dopaje o de distancia entre contactos suele exigir una pieza nueva, tiempo de proceso y una ronda de caracterizaciones especializadas. Antes de gastar esa cadena de fabricación, conviene preguntar si la respuesta eléctrica del dispositivo se puede anticipar con un modelo físico en la computadora. Aquí se responde con un caso concreto: un fotodetector ciego al sol. La computadora formula una predicción bajo un modelo y unas condiciones elegidas; la pieza fabricada la confronta; y cuando predicción y medida no coinciden, el desacuerdo obliga a precisar qué faltaba en el modelo. Luz, detector y cálculo entran juntos en esa pregunta como se ve en la figura 1. La pregunta es de diseño: ¿qué tanto se puede saber del dispositivo antes de que exista en el laboratorio?

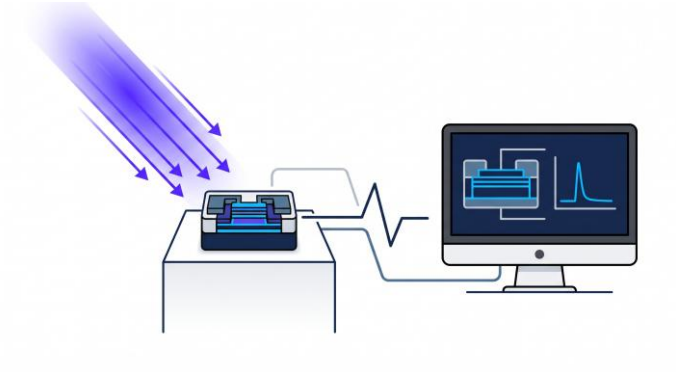


Figura 1. Luz ultravioleta, detector y computadora. La curva en pantalla representa una predicción.

2. La luz que no vemos.

Para diseñar un detector hace falta saber qué se quiere detectar. Si se modifica la longitud de onda (color), entonces cambia la energía disponible para interactuar con un material, y con ella cambia lo que un detector puede registrar, como se describe más adelante. El ojo humano solo traduce en color una franja estrecha, la luz visible, del rojo al violeta. Fuera de ella hay radiación que no vemos y, aun así, la materia interactúa con esa energía. Hacia longitudes de onda mayores que el rojo está el infrarrojo. Hacia longitudes de onda menores que el violeta está el ultravioleta y, más allá, los rayos X, ver figura 2.

El ultravioleta se suele partir en UVA, UVB y UVC, de mayor a menor longitud de onda. En la banda llamada ciega al sol, éste (al nivel del suelo) aporta muy poca señal, así que un detector sintonizado ahí puede registrar radiación ultravioleta con poca interferencia del día (Feng et al., 2026). No basta con "ver luz": hay que saber en qué tramo del espectro se busca la señal y cuánta energía trae cada fotón.

La energía de un fotón y su longitud de onda cumplen $E = hc/\lambda$, donde E es la energía del fotón, h la constante de Planck, c la velocidad de la luz y λ la longitud de onda. Si disminuye λ, E aumenta, en otras palabras, el ultravioleta corto es más energético que la luz visible. Un cálculo de un fototransistor sin juntura sitúa una respuesta a 210 nm, dentro del UVC (Khurana et al., 2024). Ese número fija la longitud de onda de interés; más adelante se elige el material capaz de absorberla. Un detector no "ve" fotones: los convierte en una señal eléctrica. Cuando un fotón con energía suficiente entra en un semiconductor, puede entregar esa energía a un electrón ligado al material y liberarlo. Donde el electrón se fue queda un hueco, que se comporta como una carga positiva. Fotón absorbido, par electrón-hueco generado: esa es la primera conversión.



Figura 2. Espectro electromagnético con énfasis en el ultravioleta. La energía crece hacia longitudes de onda menores.

3. Convertir luz en electricidad.

Todavía no hay una corriente útil. Si los electrones y los huecos generados por la absorción se recombinan antes de ser colectados, la energía asociada al fotón no se convierte en una señal eléctrica aprovechable. Para evitarlo, la arquitectura del dispositivo debe proporcionar un mecanismo que favorezca la separación y el transporte de los portadores hacia contactos eléctricos adecuados. Cuando las cargas alcanzan los electrodos y circulan por el circuito externo, aparece la corriente que constituye la señal del detector como se visualiza en la figura 3.

Generar el par electrón-hueco, por tanto, no basta. Los portadores deben sobrevivir y desplazarse hasta los electrodos, y su transporte condiciona directamente el desempeño del fotodetector (Labed et al., 2024): si se recombinan, quedan atrapados o encuentran barreras durante el recorrido, la señal puede disminuir, aunque la radiación haya sido absorbida. Los contactos también forman parte del problema. La interfaz entre el semiconductor y el metal determina cómo se inyectan o extraen los portadores y puede modificar de manera apreciable la respuesta eléctrica del dispositivo; de hecho, en detectores de radiación ultravioleta se han observado respuestas diferentes al emplear distintos metales como contacto (Abrari et al., 2023).

La cadena comienza así a tomar forma: la luz debe ser absorbida, los portadores deben generarse y sobrevivir, el dispositivo debe favorecer su separación y transporte, y los contactos deben permitir su colección. Pero antes de optimizar esa arquitectura queda una decisión fundamental: elegir un semiconductor cuya estructura electrónica permita absorber precisamente el intervalo ultravioleta que interesa.
No cualquier semiconductor absorbe los fotones que interesan. El material decide qué longitudes de onda se absorben, cuáles atraviesan el volumen casi sin dejar señal y qué tan limpia queda la respuesta frente a la luz del día. La magnitud que fija ese umbral es la banda prohibida E_g: la energía mínima, en electronvoltios, para liberar un electrón. Un fotón se absorbe cuando su energía cumple. Si E_g es grande, la luz visible (de menor energía) tiende a pasar de largo y la

ultravioleta puede absorberse. Si E_g es demasiado pequeña para la banda que interesa, el material responde a fotones que el diseño preferiría ignorar. Elegir material es, entonces, responder a una necesidad de espectro.

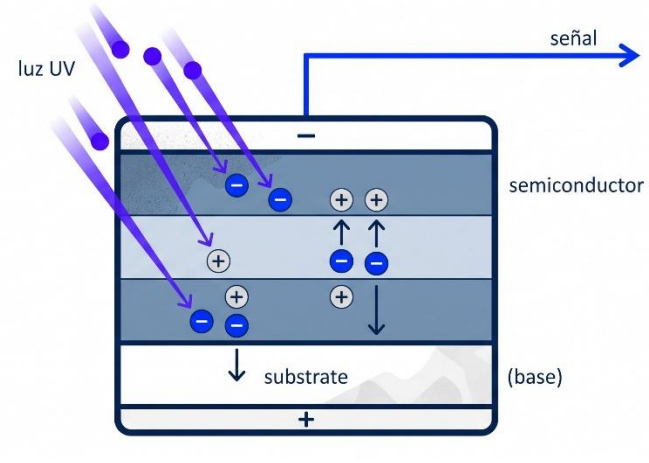


Figura 3. Conversión de luz ultravioleta en señal eléctrica dentro de un semiconductor.

4. Elegir el material.

Para la banda ciega al sol, el óxido de galio (Ga_2O_3) concentra esa necesidad. Tiene banda ultra ancha y un coeficiente de absorción que supera $10^5 cm^{-1}$ en esa franja, así que puede construir fotodetectores de alto desempeño con poco ruido de fondo solar (Feng et al., 2026). Sobre ese material se sigue aquí el problema de anticipar un detector antes de fabricarlo.

Dentro del mismo óxido de galio hay distintas formas de recoger la señal. Con electrodos interdigitales, el espacio entre digitaciones cambia corriente, responsividad y corriente en oscuridad (Lei et al., 2024). Una heteroestructura con óxido de níquel como lado p permite fabricar, medir y calibrar un modelo para ajustar la respuesta en ultravioleta profunda (Kim et al., 2025). Un diodo compacto une Ga_2O_3 dopado con silicio a una película p de NiO, con buena sensibilidad al UVC y margen de mejora hacia UVA (Moumen et al., 2025). También se han simulado fototransistores de efecto túnel con Ga_2O_3 como absorbedor (Khurana et al., 2022), y heteroestructuras $Ga_2O_3/diamante$ en geometría de mesa cuyo modelo TCAD, contrastado con datos publicados, reporta ganancia del orden de 5×10^4 y responsividad máxima de 78 A/W (Xu et al., 2023). El material fija la ventana espectral; la geometría y la pareja de capas fijan cómo se recoge la señal.

Otras necesidades piden otros materiales. El nitruro de galio se ha modelado y medido para detección ultravioleta con herramientas de cálculo de dispositivo (Abutawahina et al., 2025). El $AlGaN$ ilustra la emisión, por ejemplo, la simulación de un DUV-LED (ultravioleta profunda) se combinan cálculos basados en Teoría del Funcional de la Densidad (DFT, *Density Functional Theory*) del material con simulación SILVACO Atlas del dispositivo, observando que el uso de una capa delgada con menos aluminio mejoró el comportamiento eléctrico y óptico (Solís-Cisneros et al., 2022). Asimismo, el DFT aporta el cálculo que alimenta el TCAD, desde el coeficiente de absorción (Zhang et al., 2026), o en otros casos, como estudios donde el nitruro de galio dopado con magnesio a concentraciones altas nos muestra fenómenos donde un cálculo DFT contrastado con medidas, permitió aclarar el origen de la emisión azul y el límite de incorporación del aceptor (Hu et al., 2022). Cuando hace falta convivir con un circuito, el silicio sobre aislante integra fotodiodo y transistor en la misma pieza, con ruta compatible con CMOS (Qu et al., 2025); otra línea de silicio busca uniones *ultrashallow* para imagen en ultravioleta profunda sin abandonar procesos afines a CMOS (Guo et al., 2025). Al final, emitir en nitruros, detectar en GaN o integrar en silicio son decisiones de función, donde cada material responde a una necesidad distinta.

5. El laboratorio virtual.

Con el modelo armado, es posible preguntar qué ocurre al modificar una sola variable de diseño sin tener que fabricar cada variante. En este contexto, experimentar significa resolver nuevamente el mismo problema físico bajo una geometría, un nivel de dopaje o una configuración de contacto diferente. El solucionador vuelve a acoplar potencial y carga, transporte de portadores y generación óptica, y produce una nueva respuesta del dispositivo. Cada corrida constituye una predicción condicionada por los supuestos y parámetros del modelo; no sustituye una medición experimental, ver figura 4. Su ventaja está en el costo de exploración: permite evaluar distintas direcciones de diseño antes de comprometer material, proceso de fabricación y rondas de caracterización.



Figura 4. Diseño, simulación y resultado predicho en el laboratorio virtual.

En un fotodetector ciego al sol de óxido de galio con electrodos interdigitales, por ejemplo, la reducción de la separación entre digitaciones incrementa la corriente y la responsividad bajo iluminación, mientras que una separación mayor reduce la corriente en oscuridad (Lei et al., 2024). Tres configuraciones del mismo detector producen, por tanto, respuestas diferentes, ver figura 5. La variable es geométrica y concreta, y su efecto puede estudiarse directamente mediante simulación. Es precisamente este tipo de pregunta el que justifica construir un laboratorio virtual: no se busca únicamente reproducir el comportamiento de un dispositivo existente, sino explorar cómo podría cambiar si se modifica una variable específica.

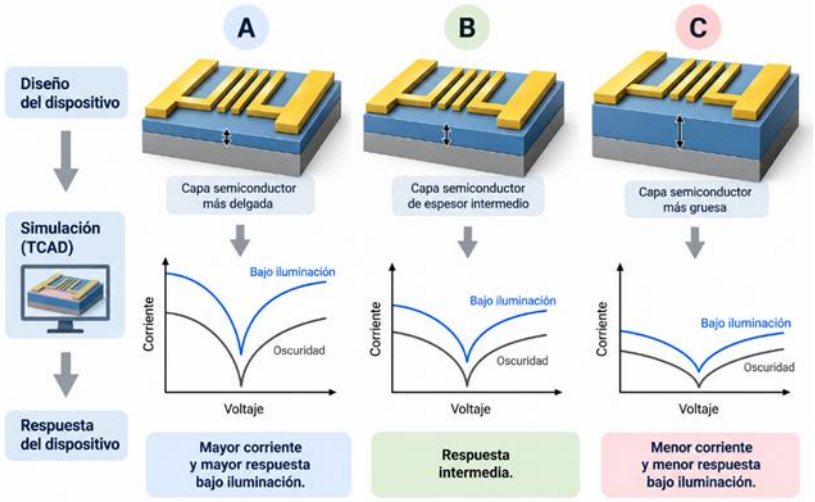


Figura 5. Representación esquemática de tres diseños del mismo detector que provocan respuestas distintas al variar el espacio entre electrodos.

Aquí se hace evidente el papel del TCAD en el proceso de diseño. La teoría de absorción y transporte explica el origen de la señal; las propiedades del material delimitan, entre otros aspectos, la ventana espectral; y el TCAD convierte ese conocimiento en un experimento numérico controlado, en el que puede evaluarse qué ocurre al estrechar o ampliar el campo eléctrico entre los contactos. La simulación permite así seleccionar una dirección de diseño antes de comprometer la fabricación de una nueva pieza.

Esta conclusión debe mantenerse dentro del alcance del modelo: la tendencia observada corresponde a esa geometría interdigital y a las condiciones consideradas, y no constituye una relación universal para todos los fotodetectores ultravioleta. La siguiente etapa es precisamente la que permite establecer cuánto de esa predicción se sostiene fuera de la computadora: confrontarla con un dispositivo fabricado y medido.

6. Experimentar sin fabricar.

A veces la predicción y la medida no coinciden. Un cristal ideal no incluye vacantes de oxígeno ni estados que puedan desviar el transporte de los portadores, ver figura 6. En un detector ciego al sol de óxido de galio, la incorporación de vacantes de oxígeno en un cálculo TCAD permite explicar conjuntamente una respuesta elevada y un apagado rápido (Luo et al., 2024). Cuando el cristal perfecto no basta, el desacuerdo no cierra el problema: señala qué fenómenos físicos podría estar omitiendo el modelo. Entre ellos pueden encontrarse estados de superficie que fijan el nivel de Fermi y modifican la responsividad estimada (Abrari et al., 2026), así como defectos inducidos por irradiación capaces de incrementar la corriente en oscuridad (Wu et al., 2025). Cada discrepancia, por tanto, plantea una pregunta concreta: ¿qué mecanismo físico debe incorporarse al TCAD antes de volver a calcular?

Una predicción se convierte en conocimiento de diseño cuando puede confrontarse con un dispositivo fabricado y medido. En el fotodetector basado en una heteroestructura de óxido de níquel y óxido de galio, primero se fabricó el dispositivo y se caracterizó mediante curvas de corriente y capacitancia. Estas mediciones permitieron calibrar el modelo TCAD y establecer una representación del dispositivo que incorporara, dentro de sus posibilidades, el comportamiento observado experimentalmente. Una vez anclado el modelo, se utilizó para explorar un ajuste de diseño que produjo una mejora del 4% en la respuesta fotónica con respecto a la configuración de partida (Kim et al., 2025).

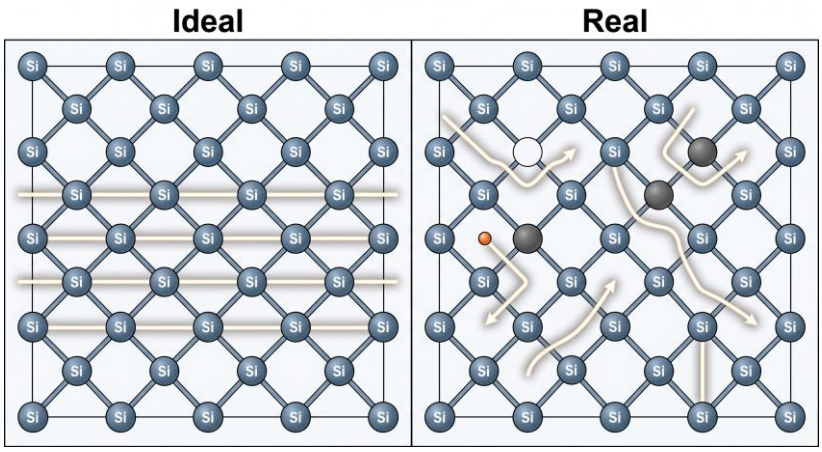


Figura 6. Red cristalina ideal y red con imperfecciones.

En esta arquitectura, el NiO cumple la función de material tipo p que forma la heteroestructura con el óxido de galio. La secuencia es importante: la medición experimental proporciona el punto de referencia para evaluar el modelo, mientras que el modelo calibrado proporciona una base para decidir qué modificación de diseño explorar a continuación. Así, la discrepancia deja de ser únicamente una diferencia entre una curva calculada y una curva medida y se convierte en información para refinar la representación física del dispositivo y orientar el siguiente diseño.

7. Cuando la predicción encuentra la pieza.

Aprender de la diferencia entre predicción y medición es, precisamente, lo que cierra el ciclo: a partir de la discrepancia se formula una hipótesis, se modifica el modelo y se recalcula para determinar si la nueva representación explica mejor el comportamiento observado. En el fotodetector basado en NiO y óxido de galio, la calibración a partir de las curvas experimentales y el ajuste posterior constituyen una realización concreta de este proceso (Kim et al., 2025). La comparación, por tanto, no debe entenderse únicamente como una prueba para decidir si la simulación "acertó" o "falló". Una diferencia entre ambas respuestas contiene información sobre los límites de la representación utilizada. Si el modelo reproduce algunas características del dispositivo, pero no otras, la pregunta cambia, es decir, ya no se trata solamente de ajustar los parámetros para reducir la diferencia, sino de identificar qué supuesto físico podría estar provocándola. La discrepancia se convierte así en una evidencia que orienta la siguiente etapa del análisis.

El propósito no es que la simulación reproduzca a la pieza a cualquier costo, sino utilizar el desacuerdo entre ambas como evidencia para identificar qué elementos físicos aún no están representados adecuadamente. Así, el diseño con TCAD permite explorar variables bajo un marco físico explícito, ver figura 7; la comparación con las mediciones muestra qué supuestos del modelo resultan insuficientes; y la incorporación de nuevas hipótesis transforma esa discrepancia en conocimiento que puede utilizarse en el siguiente diseño. En este sentido, el valor del ciclo no se encuentra en obtener una coincidencia perfecta en una única iteración, sino en construir progresivamente una representación física más fiel del dispositivo y utilizarla como punto de partida para nuevas decisiones de diseño.

Este proceso también modifica la manera en que debe interpretarse una nueva simulación. Una vez que una hipótesis física se incorpora al modelo, el siguiente cálculo ya no representa simplemente otra predicción del mismo dispositivo: constituye una prueba de si esa hipótesis permite explicar mejor la evidencia disponible. Si la discrepancia disminuye de manera consistente con las observaciones experimentales, la nueva representación adquiere mayor capacidad explicativa; si permanece, la hipótesis debe revisarse o compararse con otras posibles explicaciones. De esta manera, cada iteración aporta información incluso cuando el resultado no coincide completamente con la medición.

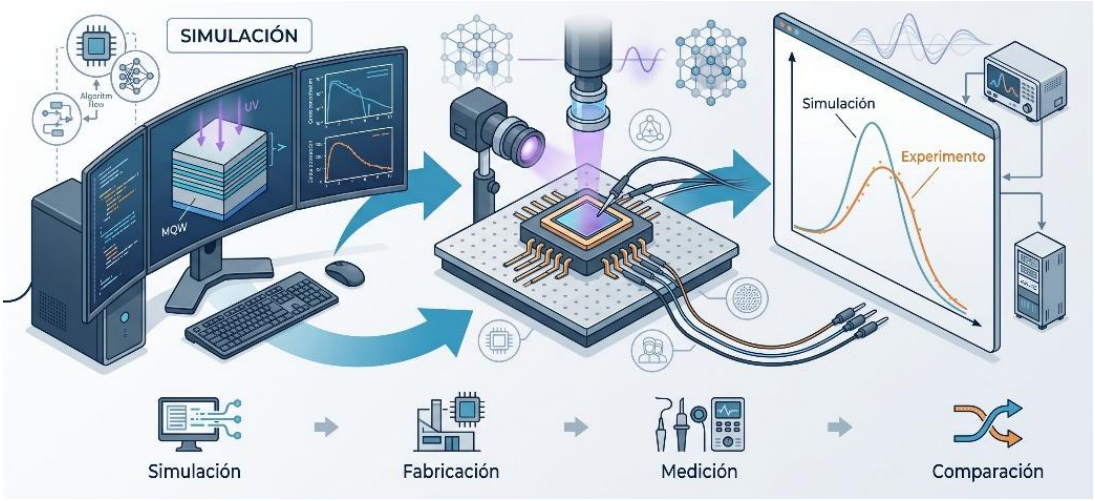


Figura 7. Proceso de validación a partir de la simulación y su comparación con mediciones.

Naturalmente, un único contraste entre simulación y experimento no permite atribuir una discrepancia a una causa única: diferentes mecanismos físicos, parámetros del material, condiciones de fabricación o incertidumbres experimentales pueden producir efectos similares. Por ello, la utilidad del ciclo depende también de la capacidad para formular hipótesis que puedan ser diferenciadas mediante nuevas simulaciones, mediciones o experimentos. El objetivo no es eliminar toda incertidumbre en una sola etapa, sino reducirla progresivamente mediante preguntas que

puedan ser contrastadas y que permitan decidir qué variable, mecanismo o configuración debe estudiarse a continuación.

8. Del ciclo de diseño a la aplicación.

Diseño, simulación, fabricación, medición y optimización forman un ciclo de trabajo en el que cada etapa aporta información para la siguiente y la optimización devuelve ese conocimiento al diseño, ver figura 8. En el caso del detector de óxido de galio, la simulación permitió explorar distintas configuraciones geométricas antes de la fabricación (Lei et al., 2024); posteriormente, las mediciones del dispositivo real se utilizaron para contrastar y ajustar el modelo (Kim et al., 2025). Cuando el comportamiento experimental no pudo explicarse mediante la representación de un cristal ideal, se incorporó una hipótesis de defecto, como la presencia de vacantes de oxígeno (Luo et al., 2024), para evaluar si ese mecanismo podía explicar la discrepancia observada.

El valor de este circuito no está en suponer que el proceso converge después de un número determinado de iteraciones, sino en establecer una forma de trabajo en la que predicción y medición se retroalimentan. La simulación orienta qué fabricar y qué variables estudiar, mientras que la medición permite determinar qué tan adecuada es la representación física adoptada y qué aspectos del modelo deben modificarse. De esta manera, cada iteración no constituye simplemente una repetición del experimento, sino una oportunidad para reducir la incertidumbre sobre el comportamiento del dispositivo y tomar decisiones de diseño con mayor fundamento.

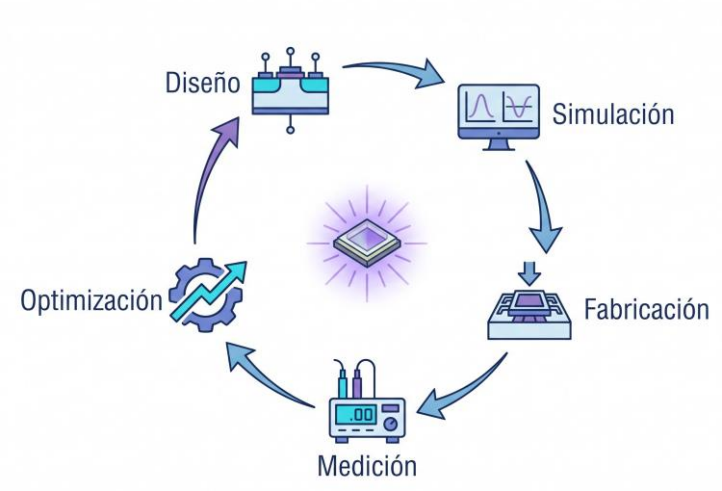


Figura 8. Ciclo de desarrollo: diseño, simulación, fabricación, medición y optimización.

Lo que se obtiene al cerrar este ciclo de análisis es más que una estimación de la respuesta del dispositivo. El TCAD permite convertir los principios de absorción óptica, transporte de carga y propiedades del material en un experimento numérico controlado, en el que las variables geométricas pueden relacionarse directamente con el comportamiento eléctrico del dispositivo. Por ejemplo, la separación entre electrodos no modifica de la misma manera la corriente generada bajo iluminación y la corriente medida en oscuridad (Lei et al., 2024), lo que permite identificar cómo la geometría interviene en la respuesta del detector y, al mismo tiempo, establecer los límites de lo que puede explicarse mediante el modelo ideal.

La comparación con el dispositivo fabricado permite entonces anclar la predicción numérica en un comportamiento experimental. Cuando las discrepancias no pueden explicarse mediante la geometría o los parámetros convencionales del material, el modelo puede ampliarse mediante hipótesis físicas específicas, como la presencia de vacantes de oxígeno (Luo et al., 2024). De esta manera, la simulación deja de ser únicamente una herramienta para obtener curvas de responsividad y se convierte en un mecanismo para formular y contrastar explicaciones sobre el funcionamiento y las limitaciones del dispositivo. El resultado es conocimiento que puede utilizarse para tomar decisiones de diseño:

qué geometría modificar, qué propiedades del material considerar y qué fenómenos deben incorporarse al modelo antes de extrapolar su comportamiento.

Este conocimiento también permite conectar el diseño del detector con su aplicación. Por ejemplo, un fotodetector basado en óxido de galio y diseñado para operar en la región ciega al sol puede aprovechar la baja contribución de la radiación solar en esa banda a nivel del suelo, haciendo posible la detección selectiva de radiación ultravioleta en aplicaciones donde esta característica resulta relevante (Feng et al., 2026). Cuando, en cambio, la prioridad es integrar el sensor con electrónica de procesamiento, una plataforma de silicio sobre aislante ofrece una ruta tecnológica compatible con flujos de fabricación CMOS (Qu et al., 2025), aunque con materiales, mecanismos de detección y alcances de aplicación diferentes, ver figura 9.

Así, el valor del diseño asistido por simulación no reside únicamente en predecir el comportamiento de un dispositivo, sino en establecer un ciclo en el que la simulación, la fabricación y la caracterización experimental permiten refinar la comprensión del dispositivo y, a partir de ella, decidir qué arquitectura y plataforma tecnológica son más adecuadas para cada necesidad de aplicación. ¿Podemos diseñar un detector ultravioleta antes de fabricarlo? Sí, si diseñar significa formular una predicción, contrastarla con la pieza y decidir qué cambiar. La computadora no reemplaza al experimento; entra en el mismo ciclo para generar conocimiento y mejorar el diseño.

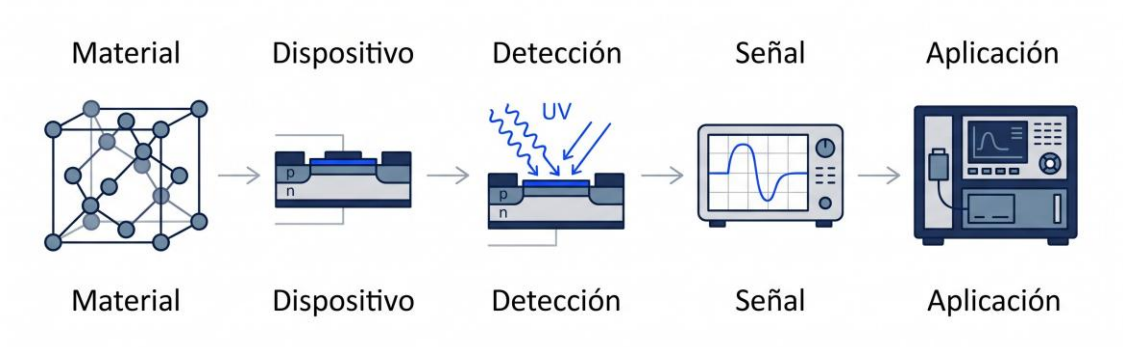


Figura 9. Del material a la aplicación.

Conclusiones.

Es posible diseñar un detector ultravioleta antes de fabricarlo, se debe de realizar una predicción, contrastarla con la pieza real y decidir qué cambiar antes de invertir en otra ronda de fabricación. Se abordó que la elección del material nace de una necesidad del espectro. Para detectar una banda prohibida alrededor de 5.9 eV (cercano a 210 nm), el óxido de galio resulta idóneo por su banda prohibida ultra ancha y su alta absorción, y la luz del Sol casi no interfiere. En este sentido, la geometría y la combinación de capas definen cómo se recoge la señal; por ejemplo, acercar los electrodos aumenta la corriente bajo luz, mientras que separarlos reduce la corriente en oscuridad.

El TCAD funcionó como un laboratorio virtual para explorar estas variables sin fabricar cada versión. Sin embargo, cada simulación es una predicción condicionada por los supuestos del modelo y no sustituye a la medición. Su valor aparece al cerrar el ciclo de diseño, simulación, fabricación, medición y optimización: en la heteroestructura NiO/Ga_2O_3, las curvas medidas permitieron calibrar el modelo y lograr una mejora del 4 % en la respuesta fotónica.

Finalmente, si la predicción y medida no coinciden, el desacuerdo no es un fracaso, sino una pista de qué física falta. Un cristal ideal no incluye defectos como las vacantes de oxígeno ni estados de superficie, y son precisamente esas imperfecciones las que pueden explicar una respuesta elevada, un apagado rápido o una corriente en oscuridad mayor a la esperada.

Un solo contraste entre simulación y experimento no permite atribuir una diferencia a una causa única, porque distintos mecanismos físicos, parámetros del material, condiciones de fabricación o incertidumbres de medición pueden producir efectos parecidos. Del mismo modo, las tendencias observadas, como el efecto de la separación entre electrodos, valen para la geometría y las condiciones estudiadas, y no son una regla universal para todos los fotodetectores ultravioleta. Por ello, la computadora no reemplaza al experimento: entra en el mismo ciclo para generar conocimiento, reducir la incertidumbre y tomar decisiones de diseño mejor fundamentadas. Su verdadero valor no está en acertar a la primera, sino en construir una imagen más fiel del dispositivo.

Créditos.

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por el respaldo proporcionado a través de su programa de posgrado (Doctorado en Ciencias de la Ingeniería). De igual manera, se agradece la invitación en la que se tuvo participación como ponente dentro del Segundo Encuentro Nacional Estudiantil en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica.

Referencias bibliográficas.

Abrari, M., Ghanaatshoar, M., Malvajerdi, S. S., Gholamhosseini, S., Hosseini, A., Sun, H., & Mohseni, S. M. (2023). *Investigating various metal contacts for p-type delafossite $CuGaO_2$ to fabricate ultraviolet photodetector.* Scientific Reports, 13, 8259. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38259-0.

Abrari, M., Malvajerdi, S. S., Ghanaatshoar, M., & Mohseni, S. M. (2026). *Fermi level pinning effect investigation on delafossite $CuGaO_2$/β-Ga_2O_3 heterojunction: Application in UV photodetectors.* Solar Energy. https://doi.org/10.1016/j.solener.2026.114716.

Abutawahina, M. S. M., Abbas, A. M. A., Hamzah, N. A., Ng, S. S., Quah, H. J., Ahmed, N. M., & Shaveisi, M. (2025). *Experimental and simulation analyses of bulk GaN-based metal–semiconductor–metal ultraviolet photodetectors.* Materials Science and Engineering: B. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118323.

Feng, X., Chen, J., Wang, X., Lu, W., Yang, X., & Feng, W. (2026). *High-performance solar-blind ultraviolet photodetector based on β-Ga_2O_3/SnO_2 heterojunction and its corona discharge detection performance.* Journal of Alloys and Compounds. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2026.187953.

Guo, S., Shen, J., Fan, Z., Liu, Y., Song, W., Zhang, R., Li, K., Bao, H., Liu, F., He, L., Gu, X., Xie, H., & Dan, Y. (2025). *Deep-UV imaging based on ultrashallow junction silicon photodiode arrays.* IEEE Transactions on Electron Devices. https://doi.org/10.1109/TED.2026.3731260.

Hu, Y., Hernández-Gutiérrez, C. A., Solís-Cisneros, H. I., Santana, G., Kudriavtsev, Y., Camas-Anzueto, J. L., & López-López, M. (2022). *Blue luminescence origin and Mg acceptor saturation in highly doped zinc-blende GaN with Mg.* Journal of Alloys and Compounds. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163133.

Khurana, M., Upasana, Saxena, M., & Gupta, M. (2022). *Highly sensitive Ga_2O_3-face tunnel field effect phototransistor for deep UV detection.* IEEE Sensors Journal, 22(18), 17769–17776. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3194653.

Khurana, M., Upasana, Saxena, M., & Gupta, M. (2024). *TCAD based investigation of junctionless phototransistor for UVC radiation detection.* Optics & Laser Technology, 172, 110486. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110486.

Kim, D., Lee, T., Kim, S., Jung, Y., Kyoung, S., & Woo, S. (2025). *Design and optimization of p-NiO/n-Ga_2O_3 heterojunction-based deep ultraviolet photodetector for high responsivity performance.* Journal of Sensors. https://doi.org/10.1155/js/4284783.

Labed, M., Kim, K., Kim, K. H., Hong, J., & Rim, Y. S. (2024). *Trap-assisted tunneling in type II Ag_2O/β-Ga_2O_3 self-powered solar blind photodetector.* Sensors and Actuators A: Physical, 372, 115368. https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115368.

Lei, J., Cai, Q., Cao, J., Ma, T., Ye, J., & Chen, D. (2024). *High-performance β-Ga_2O_3 solar-blind ultraviolet photodetectors with interdigital framework.* IEEE Transactions on Electron Devices, 71(1), 645–651. https://doi.org/10.1109/TED.2023.3335897.

Luo, L., Huang, H., Yang, L., Hao, R., Hu, X., Li, Y., Zhao, X., Zhang, Z., & Long, S. (2024). *Ultra-fast gallium oxide solar-blind photodetector with novel thermal pulse treatment.* Advanced Materials. https://doi.org/10.1002/adma.202414130.

Moumen, A., Kalvani, P. R., Mattei, F., Foti, G., Parisini, A., Mosca, R., Pavesi, M., Bosi, M., Seravalli, L., Mezzadri, F., Baraldi, A., Mazzolini, P., Vantaggio, S., Bosio, A., & Fornari, R. (2025). *Self-powered NiO/β-Ga_2O_3 heterojunction photodiode for fast broadband ultraviolet (UV) radiation detection.* Optical Materials. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117125.

Qu, Y., Chen, G., Zhang, W., Zhou, P., Liu, F., Xu, Y., & Wan, J. (2025). *A monolithically integrated UV detector with high responsivity and detectivity based on SOI technology.* IEEE Transactions on Electron Devices, 72(12). https://doi.org/10.1109/TED.2025.3629596.

Solís-Cisneros, H. I., Hu, Y., Camas-Anzueto, J. L., Grajales-Coutiño, R., Anwar, A.-R., Martínez-Revuelta, R., Hernández-de-León, H. R., & Hernández-Gutiérrez, C. A. (2022). *Theoretical and computational analysis of a wurtzite-AlGaN DUV-LED to mitigate quantum-confined Stark effect with a zincblende comparison considering Mg- and Be-doping.* Nanomaterials, 12(23), 4347. https://doi.org/10.3390/nano12234347.

Wu, G., Guo, X., Zhu, Z., Song, H., Zhong, X., Wang, J., & Guo, D. (2025). *Dose-dependent γ-ray irradiation damage effects in β-Ga_2O_3 solar-blind deep ultraviolet photodetector.* IEEE Transactions on Electron Devices, 72(12). https://doi.org/10.1109/TED.2025.3616278.

Xu, D.-Z., Jin, P., Xu, P.-F., Feng, M.-Y., Wu, J., & Wang, Z.-G. (2023). *Investigation of Ga_2O_3/diamond heterostructure solar-blind avalanche photodiode via TCAD simulation*. Chinese Physics B, 32(10), 108504. https://doi.org/10.1088/1674-1056/acc44d.

Zhang, P., Xia, X., Wang, H., Xie, Y., Kang, W., & Liang, H. (2026). *DFT-assisted TCAD simulation of the optoelectronic properties of β-Ga_2O_3/NiO extreme ultraviolet detector*. Microelectronics Journal. https://doi.org/10.1016/j.mejo.2026.107362.

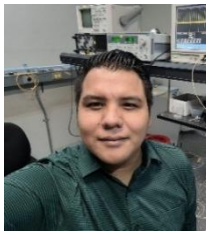
Información de los autores.



Horacio Irán Solís Cisneros es Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde obtuvo su grado en 2013. Obtuvo el grado de Maestro en Energías Renovables por la Universidad Politécnica de Chiapas en 2020 y el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería por el Tecnológico Nacional de México en 2024. Actualmente es profesor e investigador de la Universidad Politécnica de Chiapas y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel I, así como del Sistema Estatal de Investigadores de Chiapas, Nivel VI. Ha publicado 11 artículos en revistas indexadas en Journal Citation Reports (JCR) y 3 artículos en congresos nacionales e internacionales. En 2025 recibió el reconocimiento como revisor destacado de la revista Semiconductor Science and Technology de IOP Publishing. Ha participado en proyectos de investigación del Tecnológico Nacional de México y en proyectos de investigación y desarrollo en la iniciativa privada. Sus líneas de investigación incluyen inteligencia artificial y ciencia de datos, modelado y diagnóstico de sistemas mediante enfoques basados en datos e IA informada por la Física, energías renovables y sistemas fotovoltaicos, así como semiconductores y dispositivos optoelectrónicos para aplicaciones de sensado y ultravioleta.



Rubén Martínez Revuelta obtuvo la licenciatura en Física y Matemáticas, con especialidad en Física, por parte del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en la Ciudad de México en 2010; la maestría en Física, con especialidad en Termodinámica, por el mismo instituto en 2016; y el doctorado en Ciencias de la Ingeniería por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2025. Sus principales áreas de estudio son los semiconductores, la ciencia de materiales y los procesos endorreversibles. Cuenta con experiencia profesional en investigación centrada en el diseño de dispositivos fotovoltaicos y el uso de tratamientos térmicos para celdas solares. Ha participado en el desarrollo teórico para aumentar la eficiencia energética en modelos fotovoltaicos, empleando modelos matemáticos y biológicos, tales como el de la fotosíntesis. Asimismo, ha colaborado en el análisis y la mejora de dispositivos fotovoltaicos mediante el uso de software. Entre sus publicaciones destacan "A Methodology for the Use of Thermal Treatments and Their Application to Improve the Solar Efficiency of InGaN-Based Solar Cells", "The Use of Software to Analyze InGaN-Based Device Configurations" y su colaboración en "Theoretical Analysis of an AlGaN LED". Sus intereses de investigación actuales abarcan el desarrollo de nuevas tecnologías rentables para energías renovables, el desarrollo de dispositivos fotovoltaicos y el modelado matemático aplicado al sector agroindustrial. El Dr. Martínez-Revuelta es profesor en la Universidad Politécnica de Chiapas (Suchiapa, México) y en el Tecnológico Nacional de México (campus Tuxtla Gutiérrez). Es miembro de los capítulos de investigación de SPIE y OPTICA, y participa activamente en la divulgación y difusión científica con enfoques en optoelectrónica y optomecatrónica.



Carlos Alberto Megchum Ruedas es ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, con especialidad en Mecatrónica. Cuenta con una maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, con especialidad en Sistemas Optomecatrónicos, y actualmente cursa el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, donde se especializa en Fotónica y Electrónica. Su trabajo de investigación se enfoca en el desarrollo de sistemas optoelectrónicos, sensores de fibra óptica y dispositivos fotónicos. Entre sus proyectos se encuentran el diseño de láseres de fibra óptica.



Marcoantonio Ramírez Morales obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en 2018, el de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en 2021 por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Recientemente culminó el doctorado en Ciencias de la ingeniería en la misma institución educativa. Es miembro de los capítulos estudiantiles de SPIE y OPTICA. Su interés de investigación se centra en la caracterización de materiales ópticos para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos.



Pedro Marcos Velasco Bolom es Doctor en Ciencias de la Ingeniería, especializado en la caracterización de materiales para el desarrollo de sensores ópticos, por el Tecnológico Nacional de México (TecNM), campus Tuxtla Gutiérrez. Actualmente, se desempeña como posdoctorante investigador en dicho instituto, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de investigación científica y tecnológica. Cuenta con el reconocimiento por el Sistema de Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII) nivel-C. Actualmente es miembro del Sistema Estatal de Investigadores (SEI). Su carrera profesional comenzó siendo ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por parte del Instituto Politécnico Nacional, posteriormente es egresado de la Maestría en Ciencia Físicas, durante los cuales ha publicado artículos científicos en revistas de alto impacto, ha participado en congresos nacionales e internacionales en la especialidad de óptica.

Generación de supercontinuo ultra amplio embebido a partir de un láser de fibra aleatorio.

Generation of an ultra-broadband embedded supercontinuum from a random fiber laser.

Manuel Durán Sánchez* (1).
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).
manueld@inaoep.mx.

Edwin Addiel Espinosa de la Cruz (2). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
edwin_addiel@inaoep.mx.

Ulises Alcántara-Bautista (3). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
ulisesab@inaoep.mx.

Baldemar Ibarra-Escamilla (4). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
baldemar@inaoep.mx.

*correspondig author.

Artículo recibido en septiembre 02, 2026; aceptado en octubre 01, 2026.
Conferencia presentada en el Segundo Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica 2023.

Resumen.

Se presenta una fuente que genera supercontinuo (SC) ultraamplio directamente dentro de la cavidad de un láser de fibra dopada con iterbio en configuración de figura 9 (F9). La arquitectura emplea un espejo de lazo amplificador no lineal (NALM) con una reflectividad deliberadamente baja, de manera que la retrodispersión de Rayleigh en la fibra SM-2000 dentro del NALM participa en la realimentación de la cavidad. Esta realimentación, junto con la ganancia proporcionada por la fibra dopada, permite alcanzar el umbral de dispersión Brillouin estimulada (SBS), dando lugar a pulsos aleatorios de autoconmutación Q con duraciones del orden de nanosegundos y potencias pico del orden de kilowatts. Estos pulsos desencadenan el ensanchamiento espectral intracavidad al propagarse por el tramo de fibra SM-2000. Con 3 W de potencia de bombeo se obtuvo una emisión que se extiende desde la región roja del visible hasta más allá de 2100 nm; al excluir el pico principal, el espectro supera una octava, aproximadamente de 856 a 2141 nm a –20 dB, y presenta una planitud espectral mejor que 5 dB entre 1256 y 2141 nm. El enfoque integra en una misma cavidad la generación de pulsos aleatorios con conmutación Q de alta potencia pico y el ensanchamiento espectral ultraamplio, ofreciendo una alternativa simple, compacta y de bajo costo para la generación de fuentes de banda ancha con aplicaciones en espectroscopía, microscopía e imagen biomédica.

Palabras clave: Autoconmutación Q, dispersión Brillouin estimulada, láser aleatorio de fibra, óptica no lineal, retrodispersión de Rayleigh, supercontinuo.

Abstract.

An ultra-broad supercontinuum (SC) source generated directly inside the cavity of a figure-9 (F9) ytterbium-doped fiber laser is presented. The architecture employs a nonlinear amplifying loop mirror (NALM) with deliberately low reflectivity, allowing Rayleigh backscattering in the SM-2000 fiber within the NALM to contribute to the cavity feedback. This feedback, together with the gain provided by the doped fiber, enables the stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold to be reached, giving rise to random self-Q-switched pulses with nanosecond-scale durations and kilowatt-level peak powers. These pulses trigger intracavity spectral broadening as they propagate through the SM-2000 fiber segment. At a pump power of 3 W, an emission extending from the red region of the visible spectrum to beyond 2100 nm was obtained; excluding the main peak, the spectrum spans more than one octave, approximately from 856 to 2141 nm at −20 dB, and exhibits a spectral flatness better than 5 dB between 1256 and 2141 nm. The approach integrates, within the same cavity, the generation of high-peak-power random Q-switched pulses and ultra-broad spectral broadening, providing a simple, compact, and low-cost alternative for broadband light-source generation with applications in spectroscopy, microscopy, and biomedical imaging.

Keywords: Nonlinear optics, random fiber laser, rayleigh backscattering, self-Q-switching, stimulated brillouin scattering, supercontinuum.

1. Descripción de la conferencia.

La generación de supercontinuo (SC) consiste en el ensanchamiento espectral de una emisión inicialmente estrecha mediante la interacción entre la dispersión y los efectos no lineales. En fibras ópticas, este proceso puede involucrar automodulación de fase, modulación de fase cruzada, mezcla de cuatro ondas, esparcimiento Raman estimulado, inestabilidad de modulación, dinámica de solitones, desplazamiento de autofrecuencia y generación de ondas dispersivas (Agrawal, 2011; Dudley et al., 2006; Skryabin & Gorbach, 2010). La combinación de estos mecanismos permite desarrollar fuentes de luz de amplio ancho espectral, capaces de extenderse desde el visible hasta el infrarrojo, con aplicaciones en espectroscopía, microscopía, sensado y aplicaciones biomédicas (Kaminski et al., 2008; Poudel & Kaminski, 2019; Tu & Boppart, 2013).

Los esquemas convencionales para generar SC suelen emplear una fuente láser externa, ya sea pulsada o de onda continua de alta potencia, seguida de una fibra no lineal, como una fibra de cristal fotónico o una fibra altamente no lineal. Aunque estas configuraciones ofrecen gran flexibilidad, su implementación puede ser compleja. Una alternativa consiste en generar el ensanchamiento espectral dentro de la propia cavidad láser, lo que se conoce como generación intracavitaria de SC. De esta manera, la señal que inicia el SC y el medio no lineal responsable de su ensanchamiento espectral forman parte de un mismo sistema, lo que permite obtener configuraciones más compactas y simples (Alcántara-Bautista et al., 2024; Espinosa-de-la Cruz et al., 2023; He et al., 2022). Esta es precisamente la estrategia adoptada en el trabajo que se presenta en este artículo de divulgación.

Como antecedente, nuestro grupo demostró previamente una fuente de SC intracavitario basada en un láser de fibra Er/Yb con autoconmutación Q, en la que una sección larga de fibra SM-2000, implementada dentro de la cavidad como medio no lineal, permitió generar un espectro con una anchura de aproximadamente 560 nm a –5 dB, comprendido entre 1600 y 2160 nm. Este resultado mostró que los pulsos generados dentro de la propia cavidad podían proporcionar las altas potencias pico necesarias para producir un ensanchamiento espectral considerable sin recurrir a una fuente pulsada externa (Espinosa-de-la Cruz et al., 2023).

A partir de este antecedente, se implementó una nueva variante de la configuración de figura 9 (F9), en esta ocasión empleando fibra dopada con Yb como medio de ganancia. El espejo de lazo amplificador no lineal (NALM) utiliza un acoplador altamente asimétrico 99:01, cuya baja reflectividad permite que la retrodispersión distribuida de Rayleigh en la fibra SM-2000 participe activamente en la realimentación de la cavidad. Esta arquitectura favorece la generación de pulsos de alta potencia pico, capaces de producir un amplio ensanchamiento espectral dentro de la propia cavidad (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Con esta configuración se obtuvo, a una potencia de bombeo máxima de 3 W, un SC ultraamplio que se extiende desde la región roja del visible hasta más allá de 2100 nm, con un ensanchamiento superior a una octava y una amplia región de alta planitud espectral (Alcántara-Bautista et al., 2024). En este artículo de divulgación se presenta esta configuración y se describen los mecanismos físicos que permiten integrar, dentro de una misma cavidad totalmente de fibra, la generación de la señal láser, la formación de pulsos y su posterior ensanchamiento espectral.

2. Métodos.

Arquitectura experimental del sistema SC.

La fuente emplea una cavidad en configuración F9, completamente en fibra, formada por un espejo de lazo de fibra (FLM), construido con un acoplador 50:50, y un NALM, basado en un acoplador altamente asimétrico 99:01, tal como se muestra en la figura 1. El NALM contiene un tramo de 2.2 m de fibra de doble revestimiento dopada con iterbio (YDCF), bombeada con una fuente a 976 nm mediante un combinador de bombeo de (2+1) x 1. Además, incorpora un controlador de polarización (PC) y 145 m de fibra SM-2000 torcida, dando una longitud total de cavidad cercana a 150.5 m. La YDCF proporciona la ganancia para la señal láser que inicia el SC, mientras que la fibra SM-2000 actúa como medio no lineal para el ensanchamiento espectral (Alcántara-Bautista et al., 2024).

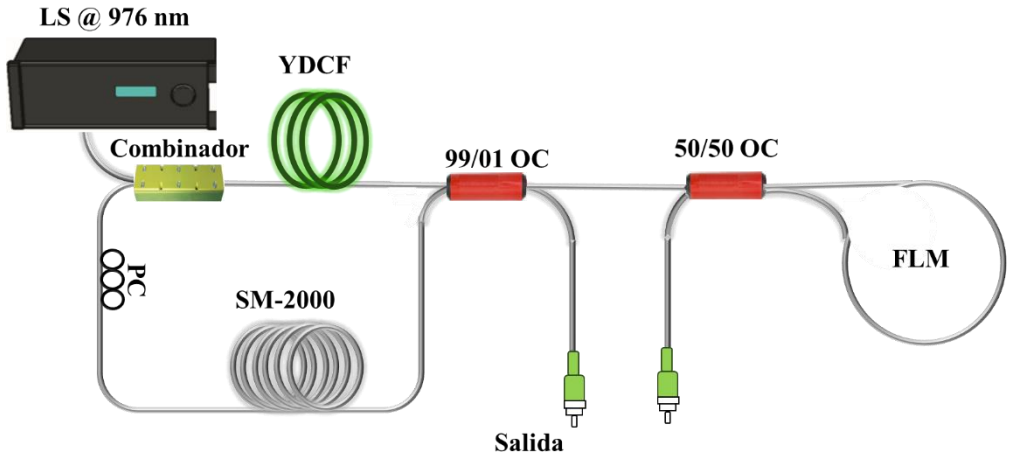


Figura 1. Esquema experimental del láser de fibra en configuración F9 empleado para la generación intracavitaria de SC. YDCF: fibra de doble revestimiento dopada con iterbio; PC: controlador de polarización; OC: acoplador óptico; FLM: espejo de lazo de fibra; LS: fuente láser. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024) © 2023 Elsevier Ltd.

Control de reflectividad y formación del régimen aleatorio.

Para un NALM ideal, la reflectividad puede escribirse de forma aproximada como en la ecuación (1):

$$\boldsymbol{R = 2\alpha(1-\alpha)[1+\cos(\Delta\varphi_L + \Delta\varphi_{NL})]} \quad (1)$$

donde α es la razón de acoplamiento, $\boldsymbol{\Delta\varphi_L}$ representa el desfase lineal asociado a la birrefringencia de la fibra y al ajuste del PC, y $\boldsymbol{\Delta\varphi_{NL}}$ corresponde al desfase no lineal acumulado entre las ondas contrapropagantes. Para α = 0.99, la reflectividad máxima ideal es cercana al 4%. Mediante el ajuste del PC, esta reflectividad puede reducirse aún más, permitiendo que la retrodispersión de Rayleigh en la fibra SM-2000 contribuya de manera significativa a la realimentación de la cavidad. Esta realimentación distribuida, en conjunto con la ganancia de la YDCF, permite alcanzar el umbral de SBS y generar pulsos de oscilación de relajación asociados a la emisión con autoconmutación Q de escala nanosegundos (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Caracterización del sistema SC.

Debido a la gran extensión espectral del SC, su caracterización se realizó mediante dos analizadores de espectro óptico: uno para el intervalo de 600 a 1200 nm y otro para el intervalo de 1200 a 2400 nm. Antes del puerto de entrada del segundo analizador se colocó un filtro de paso largo con una longitud de onda de corte de 1200 nm, con el propósito de evitar perturbaciones en la medición cuando la radiación con longitudes de onda inferiores a 1200 nm entra directamente en su sistema de detección. La señal temporal se registró mediante un fotodetector rápido de 12.5 GHz junto con un osciloscopio de 2.5 GHz. Además, los espectros de radiofrecuencia permitieron corroborar la operación pulsada y la frecuencia de repetición, así como observar la estructura de batimiento asociada con los modos longitudinales de la cavidad (Alcántara-Bautista et al., 2024).

3. Desarrollo.

Evolución espectral del SC.

El umbral del régimen de autoconmutación Q (SQS) se encuentra alrededor de 1.4 W. Al incrementar la potencia de bombeo, el espectro, iniciado por una señal semilla cercana a 1052 nm asociada con la banda de emisión del Yb, aumenta en intensidad y el espectro se ensancha progresivamente. A partir de 2.1 W, se obtiene un SC amplio, que se extiende desde alrededor de 800 nm hasta más allá de 2100 nm. Al aumentar la potencia hasta 3 W, el espectro alcanza la región roja del visible y se extiende hasta longitudes de onda superiores a 2100 nm, como se muestra en la figura 2(a). Para esta potencia máxima de bombeo, el espectro presenta una planitud espectral mejor que 5 dB entre 1256 y 2141 nm. Además, al excluir el pico principal, el espectro se extiende aproximadamente de 856 a 2141 nm a –20 dB, cubriendo más de una octava, como se observa en la figura 2(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

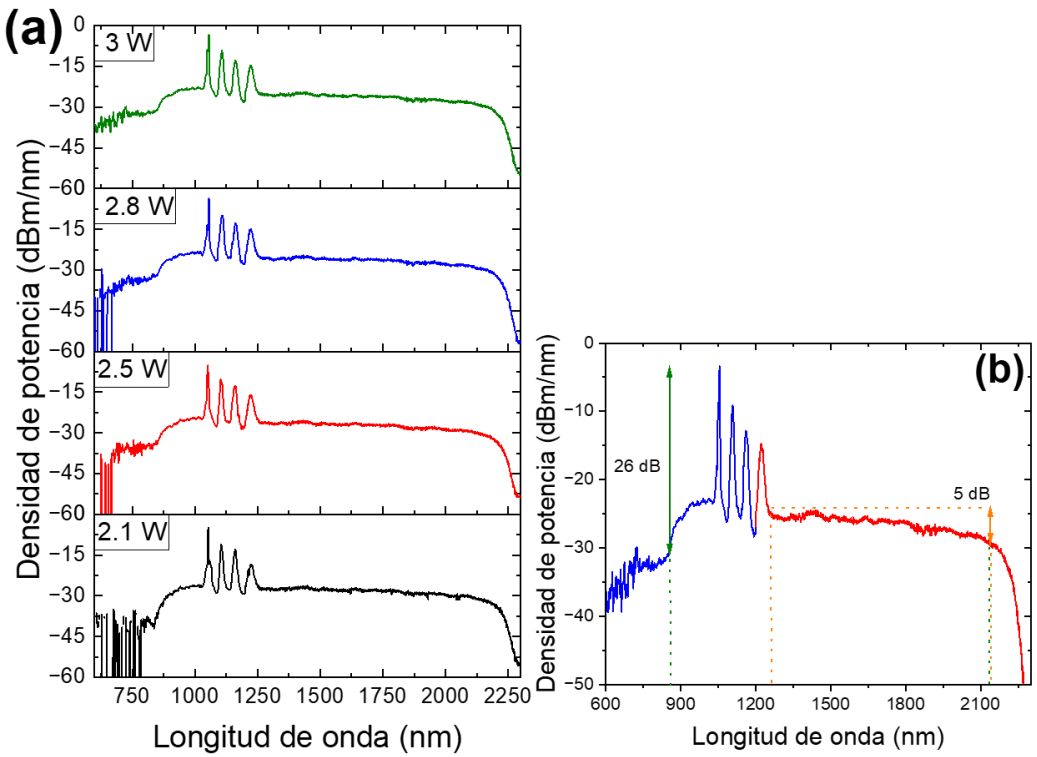


Figura 2. (a) Evolución del espectro óptico con la potencia de bombeo y (b) espectro del SC obtenido a la máxima potencia de bombeo de 3 W. Para cubrir el intervalo espectral completo, las mediciones se realizaron empleando dos OSA. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Los primeros tres picos Stokes Raman, desplazados hacia longitudes de onda mayores respecto de la señal semilla de aproximadamente 1052 nm, se originan por dispersión Raman estimulada. El cuarto pico Stokes Raman, localizado cerca de la región de dispersión cero de la fibra, actúa como señal que induce la extensión del espectro hacia la región de dispersión anómala mediante inestabilidad de modulación. Los solitones generados por este proceso experimentan posteriormente efectos como el desplazamiento de autofrecuencia y colisiones entre solitones durante su propagación por la fibra SM-2000, contribuyendo a la formación de una región espectral amplia y relativamente plana a longitudes de onda mayores. Por otra parte, la extensión hacia el visible puede atribuirse a procesos de mezcla de cuatro ondas entre la señal cercana a 1052 nm y los componentes Raman, así como a la generación de ondas dispersivas (Agrawal, 2011; Alcántara-Bautista et al., 2024).

Extensión hacia el visible.

Una característica destacable del sistema es que el ensanchamiento espectral no permanece confinado al infrarrojo. Las mediciones realizadas con un espectrómetro visible-infrarrojo cercano confirman la presencia de componentes en la región visible, extendiéndose hasta longitudes de onda cercanas a 600 nm. La componente roja del espectro SC puede incluso observarse directamente al proyectar la salida del láser sobre una pantalla blanca, como se muestra en la figura 3. Esta observación proporciona una evidencia visual directa de la ampliación del SC hacia la región visible (Alcántara-Bautista et al., 2024).

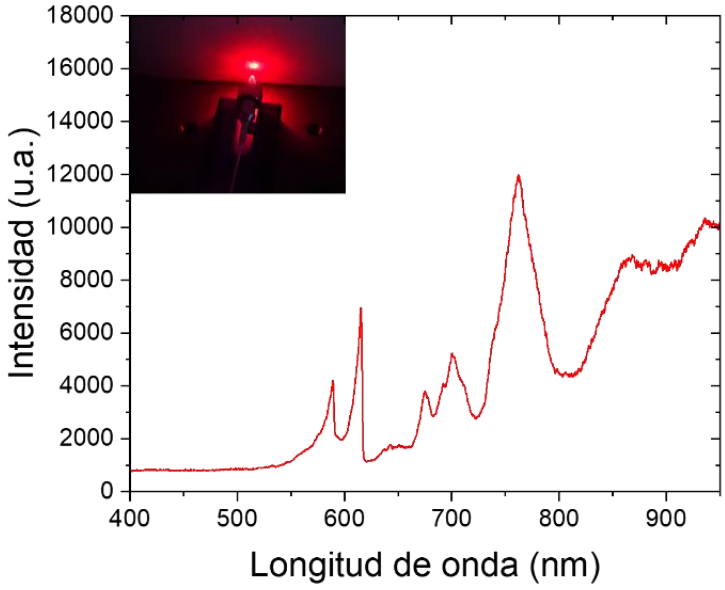


Figura 3. Espectro registrado en las regiones visible e infrarrojo cercano; el recuadro muestra la componente roja del SC proyectada sobre una pantalla blanca. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Dinámica temporal y potencia de salida.

La emisión temporal presenta una dinámica aleatoria. El tren de pulsos exhibe fluctuaciones tanto en intensidad como en la separación temporal entre pulsos consecutivos, comportamiento asociado con la naturaleza estocástica de los procesos de retrodispersión de Rayleigh y SBS. En la figura 4(a) se muestran trenes de pulsos registrados para diferentes potencias de bombeo. La frecuencia de repetición promedio aumenta casi linealmente con la potencia de bombeo, desde aproximadamente 2.9 kHz a 2.1 W hasta 5.0 kHz a 3 W, mientras que la potencia promedio de salida alcanza aproximadamente 160 mW a la máxima potencia de bombeo, como se observa en la Figura 4(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

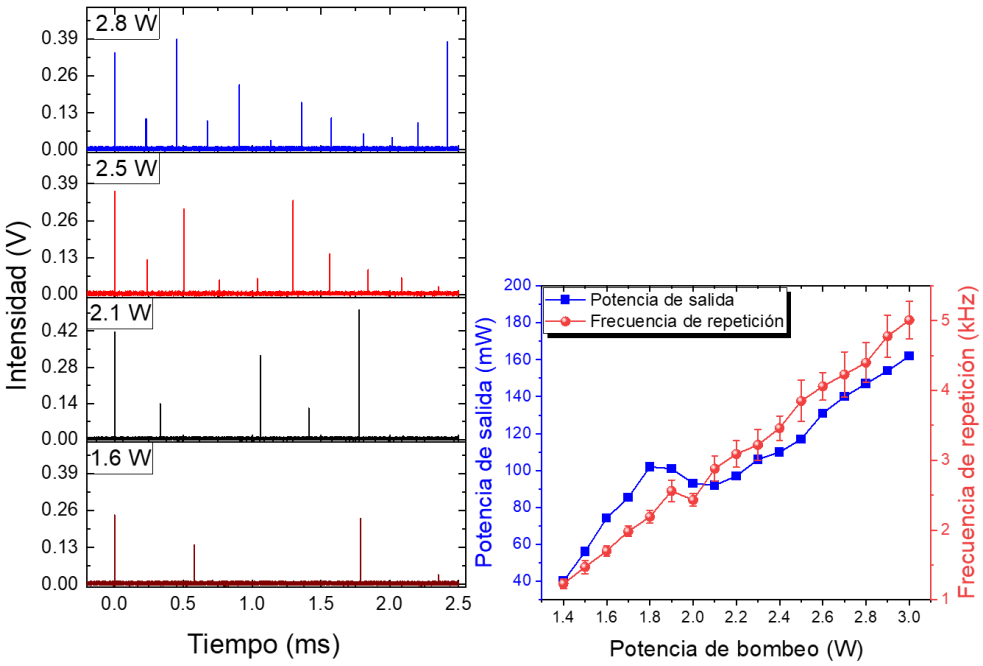


Figura 4. (a) Trenes de pulsos del régimen SQS aleatorio para diferentes potencias de bombeo y (b) evolución de la potencia promedio de salida y la frecuencia de repetición en función de la potencia de bombeo. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

Espectros de radiofrecuencia y perfil del pulso.

Los espectros de radiofrecuencia (RF) permiten corroborar el carácter pulsado y aleatorio de la emisión. A una potencia de bombeo de 3 W, el espectro alrededor de la frecuencia fundamental de repetición presenta una relación señal-ruido (SNR) cercana a 22.4 dB, como se muestra en la figura 5(a). Este valor relativamente bajo de SNR es consecuencia del carácter aleatorio de la emisión pulsada. En una ventana de frecuencia más amplia se observa además la estructura de batimiento asociada con los modos longitudinales de la cavidad, separados por 1.34 MHz, correspondiente al inverso del tiempo de ida y vuelta en la cavidad, como se aprecia en la figura 5(b) (Alcántara-Bautista et al., 2024).

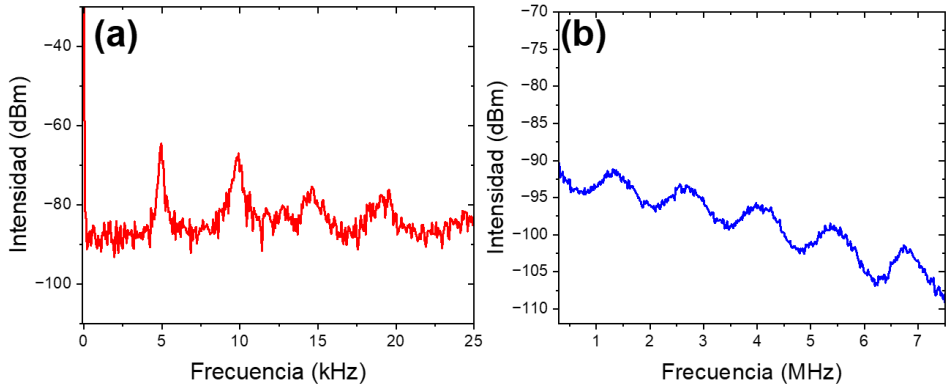


Figura 5. Espectros de RF del régimen pulsado a una potencia de bombeo de 3 W. (a) Espectro RF en un intervalo de barrido de 25 kHz y (b) espectro RF en un intervalo de 7.5 MHz, donde se observa el batimiento asociado con los modos longitudinales de la cavidad. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024). © 2023 Elsevier Ltd.

El perfil individual de los pulsos presenta una forma aproximadamente gaussiana, como se muestra en la figura 6(a). La duración de los pulsos permanece alrededor de 2.2 ns al variar la potencia de bombeo, mientras que la potencia pico estimada varía aproximadamente entre 15 y 20 kW, como se resume en la figura 6(b). Estas altas potencias pico son responsables del fuerte ensanchamiento espectral durante la propagación de los pulsos a través de la fibra SM-2000 (Alcántara-Bautista et al., 2024).

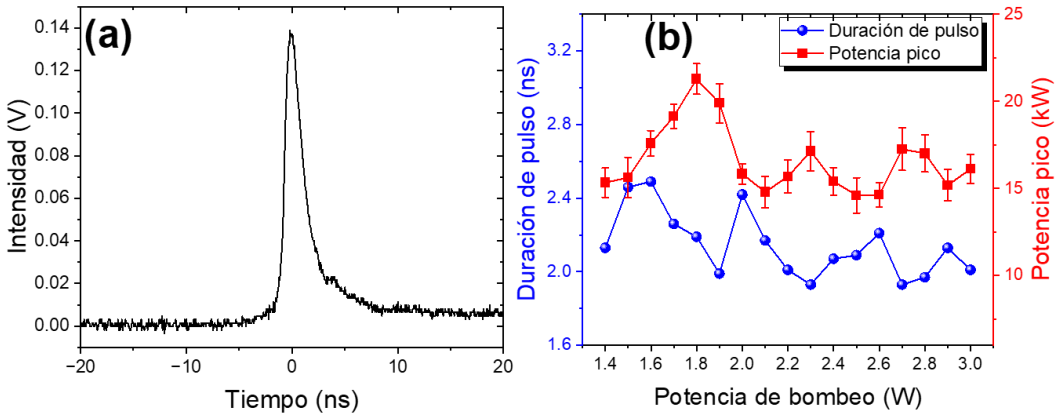


Figura 6. (a) Perfil temporal de un pulso SQS típico obtenido a una potencia de bombeo de 3 W y (b) evolución de la duración del pulso y de la potencia pico estimada en función de la potencia de bombeo. Adaptada de Alcántara-Bautista et al. (2024).

En conjunto, estos resultados muestran que el amplio ensanchamiento espectral observado resulta de la combinación entre la dinámica pulsada aleatoria de la cavidad y los procesos no lineales que ocurren durante la propagación por la fibra SM-2000. Las altas potencias pico alcanzadas por los pulsos SQS permiten generar un SC de gran anchura espectral y buena planitud mediante una configuración totalmente de fibra y sin recurrir a fibras no lineales especiales (Alcántara-Bautista et al., 2024).

Conclusiones.

Los resultados obtenidos demuestran que una cavidad totalmente de fibra en configuración F9 puede emplearse para generar pulsos aleatorios de alta potencia pico capaces de desencadenar fuertes efectos no lineales durante su propagación por un tramo de fibra SM-2000, dando lugar a la generación intracavitaria de SC. El sistema permitió obtener un SC que se extiende desde la región roja del visible (~600 nm) hasta en un borde de longitud de onda de 2200 nm, cubriendo más de una octava al excluir el pico principal y manteniendo una planitud espectral mejor que 5 dB de casi 885 nm. En conjunto, la configuración propuesta constituye una alternativa simple, compacta y de bajo costo para obtener emisiones de gran anchura espectral en sistemas completamente de fibra con gran potencial en espectroscopía óptica, tomografía de coherencia óptica, sensado e imagen biomédica.

Créditos.

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por la infraestructura experimental utilizada. El trabajo original resumido en este artículo recibió apoyo del proyecto CONACyT 287315. Los resultados experimentales, valores y figuras proceden de la publicación de Alcántara-Bautista et al. (2024), que puede consultarse para la descripción técnica completa, el tratamiento detallado de la literatura y las condiciones de medición.

Referencias bibliográficas.

Agrawal, G. P. (2011). *Nonlinear fiber optics: Its history and recent progress [invited]*. Journal of the Optical Society of America B, 28(12), A1–A10. https://doi.org/10.1364/JOSAB.28.0000A1.

Alcántara-Bautista, U., Durán-Sánchez, M., Espinosa-De-La-Cruz, E. A., Armas-Rivera, I., Bello-Jiménez, M., & Ibarra-Escamilla, B. (2024). *Intracavity ultra-broad supercontinuum generation from a figure-9 Yb-doped fiber laser*. Optics & Laser Technology, 168, 110016. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110016.

Dudley, J. M., Genty, G., & Coen, S. (2006). *Supercontinuum generation in photonic crystal fiber*. Reviews of Modern Physics, 78(4), 1135–1184. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1135.

Espinosa-de-la Cruz, E.A., Durán-Sánchez, M., Pottiez, O., Alcántara-Bautista, U., Alaniz-Baylón, J., Bello-Jiménez, M., Rodríguez-Morales, L. A., Armas-Rivera, I., & Ibarra-Escamilla, B. (2023). *Ultra-flat supercontinuum generation in an all-fiber self-Q-switched Er/Yb laser.* IEEE Photonics Technology Letters, 35(8), 454–457. https://doi.org/10.1109/LPT.2023.3254369.

He, J., Song, R., Jiang, L., & Hou, J. (2022). *Ultra-compact 50 W flat supercontinuum generation in single-stage self-Q-switched fiber laser with photonic crystal fiber*. IEEE Photonics Journal, 14(2), 1–6. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3156105.

Kaminski, C. F., Watt, R. S., Elder, A. D., Frank, J. H., & Hult, J. (2008). *Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy.* Applied Physics B, 92, 367–378. https://doi.org/10.1007/s00340-008-3132-1.

Poudel, C., & Kaminski, C. F. (2019). *Supercontinuum radiation in fluorescence microscopy and biomedical imaging applications.* Journal of the Optical Society of America B, 36(2), A139–A153. https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.00A139.

Skryabin, D. V., & Gorbach, A. V. (2010). *Colloquium: Looking at a soliton through the prism of optical supercontinuum.* Reviews of Modern Physics, 82(2), 1287–1299. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1287.

Tu, H., & Boppart, S. A. (2013). *Coherent fiber supercontinuum for biophotonics.* Laser & Photonics Reviews, 7(5), 628–645. https://doi.org/10.1002/lpor.201200014.

Información de los autores.



Manuel Durán Sánchez, investigador con más de 20 años de experiencia en fibras ópticas, óptica no lineal, láseres de fibra y sensores ópticos. Es Ingeniero en Electrónica y obtuvo los grados de Maestro y Doctor en Optoelectrónica por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 2003 y 2007, respectivamente. Realizó una estancia posdoctoral en el INAOE entre 2009 y 2010, institución donde posteriormente se incorporó como investigador en la Coordinación de Óptica. Su trabajo se centra en láseres de fibra, generación de pulsos, fuentes de banda ancha y sensado óptico. Es miembro vigente del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores hasta 2028, Senior Member de Optica (antes Optical Society of America, OSA) y Young Editorial Board Member

de High Power Laser Science and Engineering, distinción otorgada por Chinese Laser Press y Cambridge University Press para el periodo 2026–2028.



Edwin Addiel Espinosa de la Cruz, Ingeniero en Energía por la Universidad Politécnica de Chiapas, Maestro y doctor en ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Su trabajo de investigación se centra en el estudio y desarrollo de láseres de fibra óptica pulsados, óptica no lineal, dinámica de pulsos y generación de supercontinuo, particularmente en las regiones espectrales del infrarrojo cercano y medio. Ha participado como autor y coautor en trabajos científicos relacionados con láseres de fibra dopados con tierras raras, generación de pulsos mediante conmutación Q y amarre de modos, así como fenómenos no lineales en fibras ópticas.



Ulises Alcántara Bautista, Licenciado en Física por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro en Ciencias en la Especialidad de Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente es Candidato a Doctorado en Ciencias en la Especialidad de Óptica por el INAOE, en donde sus líneas de investigación se centran en la generación de supercontinuo en fibras ópticas, así como láseres de fibra óptica pulsados de alta potencia.



Baldemar Ibarra Escamilla, obtuvo el grado de Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en 1994. Recibió los grados de Maestría y Doctorado en Óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 1996 y 1999, respectivamente. Realizó una estancia Postdoctoral y un año Sabático en la Universidad de Dayton, USA; durante el 2000 y de julio de 2008 a julio de 2009, respectivamente. Actualmente está interesado en la modelación, simulación y experimentos en óptica lineal y no lineal. Sus tópicos de investigación incluyen: fenómenos lineales y no lineales, sensores, y amplificadores de fibra óptica; láseres sintonizables, láseres de amarre de modos y láseres de alta potencia de fibra óptica. Es “Fellow Member” de la International Society for Optical Engineering (SPIE), “Senior Member” de “Optica” (antes OSA), miembro de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), miembro regular de la Sociedad Mexicana de Física (SMF) y de la Academia Mexicana de Óptica (AMO). Es investigador Titular “D” y pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investicadores (SNII) con el Nivel III.

Aprovechamiento de residuos agroindustriales en la generación de energía eléctrica.

Use of agro-industrial waste in electricity generation.

Rocío Meza Gordillo* (1).
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx.

Jorge Luis Camas Anzueto (2). Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
jcamas@tuxtla.tecnm.mx.

Arnulfo Rosales Quintero (3). Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.
arquinte@tuxtla.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 13, 2026; aceptado en octubre 13, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Segundo Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2023.

Resumen.

Las celdas alcalinas abióticas (CAA) representan una alternativa prometedora para la generación de energía eléctrica sostenible a partir de la oxidación de compuestos orgánicos en medio básico. En este trabajo se evaluó el aprovechamiento de biomasa residual de Mangifera indica L. cv "Haden" (semilla y cáscara) como combustible orgánico. Inicialmente se caracterizó la respuesta del voltaje en circuito abierto utilizando sustratos modelo (glucosa y almidón) y bases fuertes (NaOH y KOH) en distintas concentraciones. Se diseñó un prototipo funcional miniaturizado e impreso en 3D mediante software CAD. Al utilizar harina de semilla de mango (0.3 *g/mL) y NaOH* 6 *M, la CAA alcanzó un voltaje máximo de salida en circuito abierto de* 1103.2 ± 22 *mV, una densidad de potencia de* 0.613 ± 0.004 *mW* cm^{-2}*, una densidad de corriente de* 2.25 ± 0.091 *mA* cm^{-2} *y una resistencia interna de* $545.54\ \Omega$*. La generación continua de energía se mantuvo durante* 144 *h, demostrando la factibilidad de valorización energética de esta biomasa agroindustrial.*

Palabras clave: Biomasa residual, celda alcalina abiótica, impresión 3D, *Mangifera indica*, potencial eléctrico.

Abstract.

Abiotic alkaline fuel cells (AAC) generate electricity through the oxidation of organic compounds under strong basic conditions. This study evaluated the use of residual biomass from Mangifera indica L. cv "Haden" (seed and peel) as an organic fuel. Initially, open-circuit voltage behavior was characterized by using model substrates (glucose and starch) and strong bases (NaOH and KOH) at different concentrations. A miniaturized functional prototype was designed and 3D printed using CAD software. Using mango seed flour (0.3 *g/mL) and* 6 *M NaOH, the AAC achieved an open-circuit output voltage of* 1103.2 ± 22 *mV, a power density of* 0.613 ± 0.004 *mW* cm^{-2}*, a current density of*

2.25 ± 0.091 *mA* cm^{-2}*, and an internal resistance of* 545.54 Ω*. Electrical energy generation was sustained over* 144 *h, demonstrating the feasibility of energy recovery from this agricultural waste.*

Keywords: 3D printing, abiotic alkaline cell, electrical potential, Mangifera indica, residual biomass.

1. Descripción de la conferencia.

El consumo global de energía eléctrica requiere el desarrollo de fuentes asequibles, seguras, sostenibles y modernas. Las celdas de combustible biológico (CCB) son dispositivos electroquímicos capaces de convertir directamente la energía química contenida en enlaces orgánicos en energía eléctrica. Dentro de esta clasificación, las celdas alcalinas abióticas (CAA) ofrecen ventajas sustanciales frente a los sistemas bióticos: pueden operar a temperatura ambiente, no dependen del mantenimiento metabólico de cultivos microbianos o enzimáticos, poseen una menor huella ambiental y facilitan su miniaturización.

La biomasa residual de origen agrícola representa un recurso renovable abundante. En México, la producción anual de mango (Mangifera indica L.) supera los 2 millones de toneladas, de las cuales cerca del 16% se industrializa, generando hasta un 50% de desperdicios integrados por cáscaras (15-20%) y semillas (35-60%). Dichos residuos son ricos en carbohidratos poliméricos como el almidón y ácidos orgánicos. En medio alcalino, los carbohidratos sufren hidrólisis facilitada y oxidación catalítica, liberando electrones que pueden ser transferidos desde el ánodo hacia el cátodo a través de un circuito externo.

El objetivo del presente trabajo consistió en diseñar, construir y evaluar un prototipo funcional de celda alcalina abiótica alimentada con harina de residuos de M. indica L. cv "Haden" para la generación de energía eléctrica renovable.

2. Métodos.

Preparación de las muestras.

Los frutos de mango (M. indica cv. "Haden") en estadio de madurez comercial 4 se obtuvieron en Tapachula, Chiapas. Las cáscaras y semillas fueron separadas, deshidratadas en horno de charolas a $60 \pm 2°C$, molidas y tamizadas a un tamaño de partícula < 0.500 mm.

Configuración preliminar y diseños factoriales.

Para identificar la base y el sustrato de mejor desempeño, se utilizó una celda modelo con un volumen de reacción de 20 mL, ánodo de carbono (0.85 cm^2) y cátodo de zinc (0.85 cm^2) distanciados a 4 cm.

Efecto de la base y sustrato.

Para conocer el efecto de la base y el sustrato se aplicó un diseño factorial 2^2 evaluando glucosa y almidón (0.1 g/mL) con NaOH y KOH (1 M).

Efecto de las concentraciones de la base.

Se utilizó un diseño 3^2 combinando NaOH ($2, 4$ y 6 M) con almidón ($0.1, 0.2$ y 0.3 g/mL) para conocer el efecto de las concentraciones y definir las condiciones de generación de energía.

Sustrato residual.

Para conocer el sustrato que generara la mayor respuesta, se implementó un diseño factorial mixto 3×2 evaluando el tipo de residuo (semilla, cáscara y mezcla 1: 1) a 0.3 g/mL en presencia de NaOH y KOH (6 M).

Diseño y fabricación del prototipo de CAA.

El prototipo físico se proyectó en el software SOLIDWORKS 2020 considerando un volumen de cámara de 20 mL (2 cm × 5 cm × 2 cm), un espacio de cabeza del 20% y dimensiones externas de 3.5 cm × 6.5 cm × 4 cm con paredes de 7.5 mm. La estructura fue fabricada en una impresora 3D FLASHFORGE Guider IIs.

Mediciones electroquímicas y analíticas.

El voltaje de salida en circuito abierto (V_{CA}) se monitoreó con un multímetro digital RADOX. Las pruebas en circuito cerrado emplearon resistencias de carga (100 Ω a 500 kΩ) para construir las curvas de polarización y potencia. La intensidad (I), potencia (P) y resistencia interna (R_I) se calcularon mediante las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

$$P = V \cdot I \quad (2)$$

$$R_I = \frac{V_{CA} - V_R}{I} \quad (3)$$

La concentración de azúcares reductores se cuantificó por el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) a 540 nm. Los productos de oxidación se identificaron mediante Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear de Protón (^{1}H-RMN).

3. Desarrollo.

Evaluación de sustratos modelo y bases.

En la evaluación con sustratos puros (1 M de base), el almidón generó voltajes superiores y más estables que la glucosa (1048.33 ± 10 mV con NaOH frente a 1005.83 ± 12 mV). Esto se debe a que la glucosa monomérica se consume rápidamente, mientras que el almidón experimenta una hidrólisis alcalina gradual que suministra monómeros oxidables de forma sostenida. Al incrementar la concentración del electrolito, la solución de NaOH 6 M con 0.3 g/mL de almidón alcanzó un voltaje máximo de 1267.5 ± 10 mV, atribuido a la mayor conductividad iónica y abundancia de iones OH^-, en comparación con la hidrólisis con KOH. En la figura 1 se muestra el comportamiento obtenido de la glucosa y e almidón en soluciones de NaOH y KOH.

Desempeño de los residuos de *M. indica* cv "Haden".

Al sustituir los sustratos sintéticos por la biomasa de mango, la harina de semilla combinada con NaOH 6 M obtuvo el mejor desempeño eléctrico ($V_{CA} = 1038.55 \pm 4$ mV). La semilla demostró ser superior a la cáscara debido a su alto contenido de almidón y presencia de ácidos orgánicos descarboxilables en medio básico. En la figura 2 se muestra el prototipo impreso en 3D.

Como se observa en la Tabla 1, los parámetros eléctricos máximos obtenidos en el prototipo optimizado superan los valores reportados en la literatura para celdas abióticas con sustratos complejos.

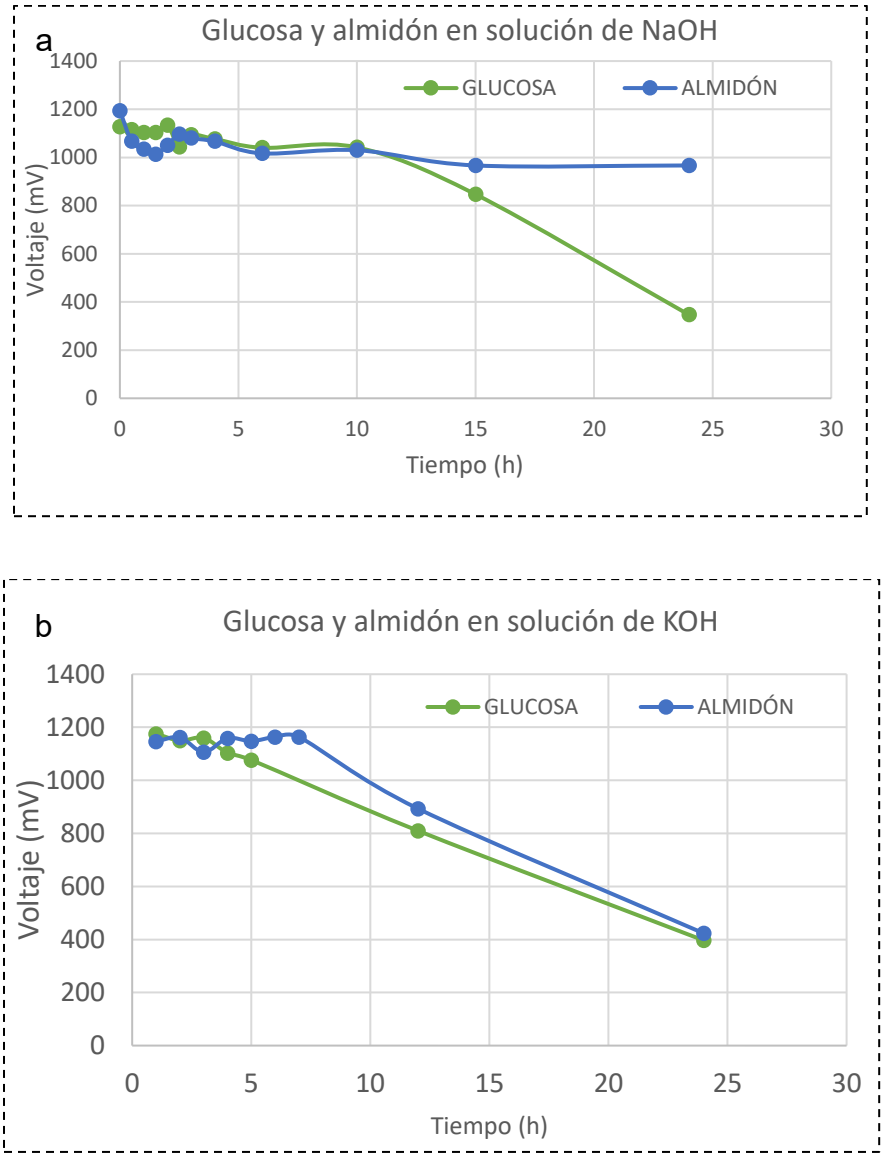


Figura 1. Comportamiento del voltaje de salida en celdas alcalinas abióticas alimentadas con glucosa y almidón, a) usando NaOH; b) usando KOH.

El análisis por ^{1}H-RMN confirmó la presencia del hidrógeno del carbono anomérico de la glucosa (5 ppm) desde la hora 0 hasta la 144, validando la hidrólisis continua del almidón de la semilla, así como señales asociadas a metilos de ácidos carboxílicos de cadena corta (2 ppm) generados como subproductos de oxidación. La identificación de productos de oxidación nos ayudó a corroborar que el almidón es aprovechado en las condiciones establecidas, así como el aprovechamiento de ácidos carboxílicos, ya que se pudo verificar la presencia de un ácido de cadena corta. Sin embargo, es necesario un estudio amplio para poder entender el mecanismo de oxidación del residuo de semilla de M. indica L. cv "Haden" como HPLC, RMN 13C, por mencionar algunas técnicas.

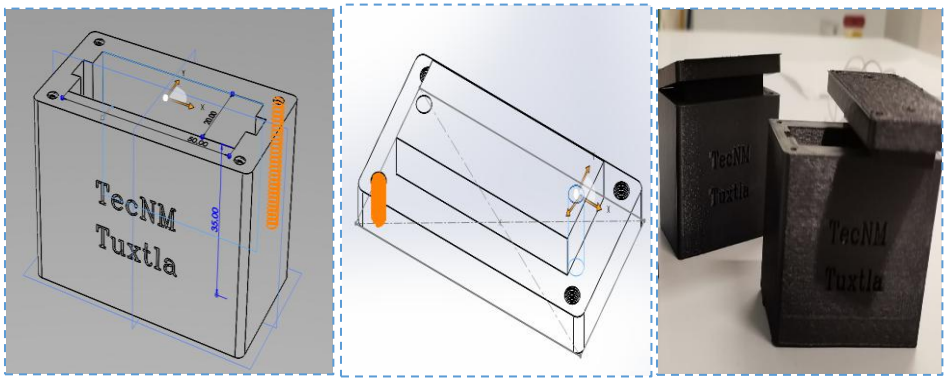


Figura 2. Esquema del prototipo geométrico de la celda alcalina abiótica impreso en 3D.

Tabla 1. Mediciones eléctricas de la CAA optimizada frente a otros sustratos de literatura.

Sustrato / Configuración	**Voltaje (mV)**	**Densidad de corriente (mA cm^{-2})**	**Densidad de potencia (mW cm^{-2})**	**Resistencia interna (Ω)**	**Referencia**
Residuo Semilla *M. indica*	1103.2 ± 22	2.25 ± 0.091	0.613 ± 0.004	545.54	Este trabajo
Glucosa 1 M	760 ± 6	0.78	0.25	—	Liu et al., 2016
Jugo de *Carica papaya*	750	—	0.70	—	Provera et al., 2016
Terminalia catappa	990 ± 9	—	0.25	—	Togibasa et al., 2019

Conclusiones.

Se demostró la factibilidad técnica de utilizar residuos de harina de semilla de *Mangifera indica* L. cv "Haden" como sustrato renovable para la generación de energía eléctrica en celdas alcalinas abióticas.

La concentración de la base fuerte (NaOH 6 M) incrementó significativamente la conductividad del electrolito y promovió la hidrólisis de la biomasa, obteniendo un voltaje estable durante 144 h de operación.
El prototipo miniaturizado impreso en 3D registró una densidad de potencia máxima de 0.613 ± 0.004 mW cm^{-2} y una resistencia interna de 545.54 Ω, superando los parámetros típicos reportados para este tipo de dispositivos abióticos.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez por las facilidades otorgadas en la realización de este proyecto.

Referencias bibliográficas.

Liu, X., Li, Z., Yang, Y., Liu, P., & Zhang, P. (2016). *Electricity generation from a refuelable glucose alkaline fuel cell with a methyl viologen-immobilized activated carbon anode.* Electrochimica Acta, 222, 1430–1437.

Provera, M., Han, Z., Liaw, B. Y., & Su, W. W. (2016). *Communication—Electrochemical Power Generation from Culled Papaya Fruits.* Journal of The Electrochemical Society, 163(7), A1457.

Togibasa, O., Haryati, E., Dahlan, K., Ansanay, Y., Siregar, T., & Liling, M. N. (2019). *Characterization of Bio-battery from Tropical Almond Paste.* Journal of Physics: Conference Series, 1204(1), 012036.

Información de los autores.



Rocío Meza Gordillo es profesora de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Desarrolla proyectos de investigación relacionados con la valorización de residuos agroindustriales, extracción y síntesis orgánica de compuestos de interés relacionados con la generación de materiales.



Jorge Luis Camas Anzueto es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Chiapas. Obtuvo su grado de maestría y doctorado en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente ostenta el reconocimiento en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel II por parte de la SECIHTI. Fue galardonado con el Reconocimiento al Mérito Estatal a la Investigación en 2016 en la categoría III. Líder de la línea de investigación Sistemas Optomecatrónicos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica (MCIM) y Líder de la línea de Investigación Fotónica y Electrónica del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI) del ITTG. Ha publicado más de 70 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en la Journal Citations Reports (JCR), 22 artículos en revistas de otros índices. Cuenta con más de 150 memorias de congresos nacionales e internacionales y ha dirigido proyectos de investigación CONAHCYT, TecNM, y FOMIX.



Arnulfo Rosales Quintero es profesor investigador del Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Sus intereses profesionales se enfocan en las áreas de fenómenos de transporte, cultivo y escalamiento de microalgas e ingeniería de procesos.

Aplicaciones de la optomecatrónica en la agricultura de precisión.

Applications of optomechatronics in precision agriculture.

Madaín Pérez Patricio* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
madain.pp@tuxtla.tecnm.mx.

Abiel Aguilar González (2). Instituto Nacional de Astrofísica, Optica y Electrónica, abiel@inaoep.mx.

Juan Antonio de Jesús Osuna Coutiño (3). Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez, antonio.osuna@tuxtla.tecnm.mx.

Ernesto Alonso Ocaña Valenzuela (4). Tecnológico Nacional de México/IT Comalcalco, alonso.ov@comalcalco.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 14, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Primer Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2022.

Resumen.

La integración de sistemas optomecatrónicos en la agricultura de precisión ofrece soluciones automatizadas, no invasivas y en tiempo real para el monitoreo biológico. Este artículo presenta dos aplicaciones principales que combinan óptica, mecánica, electrónica y computación: la evaluación del estado fisiológico en plantas mediante un sistema de fluorescencia inducida por láser y la optimización del pastoreo avícola utilizando visión por computadora y automatización. Se describe el uso de configuraciones ópticas especializadas y algoritmos de aprendizaje automático para identificar deficiencias nutricionales en forraje verde hidropónico y el uso de edge computing para automatizar el desplazamiento de jaulas basado en el comportamiento de las aves.

Palabras clave: Agricultura de precisión, aprendizaje automático, estimación de pose, fluorescencia inducida por láser, optomecatrónica.

Abstract.

The integration of optomechatronic systems in precision agriculture offers automated, non-invasive, real-time solutions for biological monitoring. This article presents two main applications combining optics, mechanics, electronics, and computing: the evaluation of the physiological state in plants using a laser-induced fluorescence system and the optimization of poultry grazing using computer vision and automation. The use of specialized optical configurations and machine learning algorithms to identify nutritional deficiencies in hydroponic green fodder and the use of edge computing to automate cage movement based on bird behavior are described.

Keywords: Laser-induced fluorescence, machine learning, optomechatronics, pose estimation, precision agriculture.

1. Introducción.

Cuidar la salud de nuestros cultivos y ecosistemas es vital para asegurar el futuro de la agricultura y nuestro medio ambiente. En la búsqueda de incrementar la productividad en el campo de forma sostenible, ha surgido una gran aliada tecnológica: la optomecatrónica. Esta fascinante disciplina combina la óptica (el uso de la luz, láseres y cámaras), la mecánica y la electrónica o computación para crear herramientas capaces de monitorear la naturaleza con una precisión que antes parecía de ciencia ficción. En este artículo, exploraremos cómo la tecnología optomecatrónica une dos grandes metas que están transformando la agricultura de precisión. Por un lado, abordaremos el análisis del estado fisiológico de las plantas; veremos cómo el uso de rayos láser en entornos controlados de laboratorio nos permite "leer" la salud de especies invaluables, mucho antes de que el ojo humano o los métodos visuales tradicionales noten algún daño por estrés, contaminación o sequía. Por otro lado, descubriremos cómo estas mismas bases tecnológicas de captura óptica se aplican para lograr un pastoreo eficiente en aves de corral. Usando cámaras e inteligencia artificial para la estimación de pose en gallinas, los productores pueden traducir el comportamiento de un rebaño en un indicador directo de la cantidad y calidad de pastura disponible en el suelo. Ambos enfoques demuestran que observar la naturaleza a través de sensores optomecatrónicos es el futuro para maximizar el rendimiento agrícola y proteger los ecosistemas. Pero, ¿cómo logramos exactamente que un láser nos hable de la salud de un cultivo? La respuesta se encuentra en el interior de las hojas, en una molécula que todos conocemos: la clorofila.

2. La clorofila, el valioso Neem y los estudios de laboratorio.

La clorofila no es solo el pigmento que le da el color verde a las plantas; es el motor de la vida vegetal. Su trabajo principal es atrapar la luz del sol y convertirla en energía, lo que se conoce como fotosíntesis (Legendre et al. 2021). Cuando la luz del sol choca contra una hoja, la energía atrapada por la clorofila tiene tres caminos: usarse para la fotosíntesis, disiparse como calor, o emitirse como un tenue brillo invisible llamado fluorescencia (Zhang et al. 2018).

Para entender la vital importancia de medir este brillo, los científicos se han enfocado en especies de altísimo valor estratégico, como el árbol de Neem (Azadirachta indica). Este árbol es considerado un verdadero tesoro en la agricultura porque sus hojas y semillas producen metabolitos secundarios (como la azadiractina) que funcionan como pesticidas y fungicidas biológicos muy potentes, controlando plagas sin dejar residuos tóxicos en el ecosistema. Sin embargo, el Neem se utiliza frecuentemente en la reforestación urbana, donde se enfrenta a niveles críticos de contaminación vehicular y metales pesados que asfixian sus estomas y destruyen su clorofila desde adentro, amenazando la producción de estas valiosas sustancias. Es aquí donde el protocolo de análisis optomecatrónico marca la diferencia. En lugar de realizar observaciones imprecisas a la intemperie, el método propuesto exige que las hojas de Neem sean cortadas y llevadas a un ambiente de laboratorio estrictamente controlado. Al aislar la muestra de las variaciones del clima, los investigadores logran medir la salud celular con exactitud (Pérez-Patricio et al. 2018).

Estudios reportados en este tipo de protocolos demuestran que cuando las plantas se exponen a estrés (como radiación UV, falta de agua o polución urbana), la planta intenta defenderse produciendo pigmentos protectores (como antocianinas). En el laboratorio, el escáner láser detecta cómo cambian las proporciones de los colores que emite la hoja; por ejemplo, se observan alteraciones claras en el cociente de fluorescencia azul frente a la fluorescencia roja (F410/F550) y verde. Al medir estos cambios sutiles bajo condiciones controladas, el protocolo permite confirmar que el árbol está enfermo mucho antes de que las hojas muestren manchas amarillas o sequedad.

La revolución del láser (LIF): Leyendo el estrés de manera impecable.

La tecnología que hace posible este nivel de diagnóstico en el laboratorio se llama Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) y sus componentes se muestran en la figura 1. Los aparatos tradicionales (fluorómetros con pinzas) requerían tocar la hoja y oscurecerla por media hora, lo que además de lento, podía inducir un estrés mecánico (Lei et al. 2018). Con el sistema LIF dentro del laboratorio, se dispara un rayo láser de alta precisión a la hoja recién cortada. El láser excita a la clorofila y fuerza a la hoja a emitir su fluorescencia natural. Los sensores de las computadoras miden principalmente dos tonos invisibles: la luz roja (alrededor de los 685 nanómetros) y la luz rojo lejano (cerca de los 735 nanómetros). En una hoja sana y repleta de clorofila, la luz roja es absorbida por la propia hoja, por lo que casi no

logra salir hacia el sensor. Pero si la hoja de Neem está intoxicada por la ciudad, su clorofila se rompe y deja de absorber; repentinamente, la luz roja "escapa" de la hoja y el sensor la capta en grandes cantidades. La computadora simplemente divide el nivel de luz roja entre la luz rojo lejano; si el número sube, es una alarma matemática indudable de que la planta está sufriendo estrés.

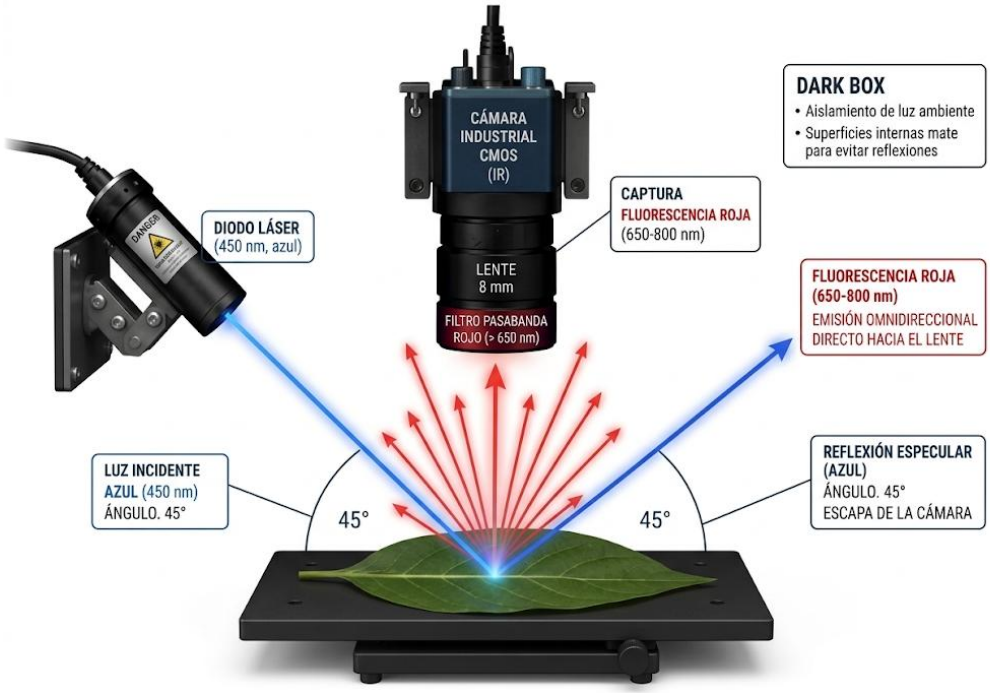


Figura 1. Configuración del sistema óptico.

3. De las plantas a los animales: La estimación de pose en gallinas para evaluar pastizales.

La optomecatrónica y la captura visual no solo sirven para diagnosticar hojas en un laboratorio; esta misma ciencia de la imagen está transformando la manera en que manejamos a los animales en el campo. A través de la llamada Agricultura de Precisión en Ganadería (Precision Livestock Farming), el análisis óptico se usa para monitorear aves de corral y, sorprendentemente, evaluar la salud del suelo que pisan. La clave de este avance es la estimación de pose en gallinas (Guo et al. 2020). Utilizando cámaras colocadas sobre los pastizales (visión "top-down") y programas de Inteligencia Artificial (específicamente redes neuronales como los algoritmos YOLOX y EfficientNet), el sistema es capaz de observar a docenas de gallinas simultáneamente y "dibujar" un esqueleto virtual sobre ellas. La computadora localiza puntos anatómicos clave: el centro del cuerpo, la cabeza y las patas. Midiendo las distancias matemáticas entre estos puntos, el algoritmo clasifica al instante la postura exacta del ave: si está descansando, de pie, caminando o en una pose activa de forrajeo, picoteando y rascando la tierra (Waldmann et al. 2024). ¿Por qué es esto importante para el campo? Porque la postura y el comportamiento del animal actúan como un sensor biológico de la disponibilidad de la pastura. Los estudios en ecología del pastoreo demuestran que las aves adaptan su presupuesto de tiempo según la calidad del alimento que encuentran. Si el pasto es abundante, denso y nutritivo, las gallinas logran llenarse con poco esfuerzo. Como resultado, pasan mucho más tiempo en posturas estáticas, descansando o socializando tranquilamente.

Por el contrario, si la parcela empieza a quedarse sin forraje verde o el pasto es maduro y de mala calidad, el comportamiento de las gallinas cambia drásticamente. El tiempo invertido en posturas de forrajeo activo, buscando alimento y moviéndose aumenta, porque necesitan invertir mucha más energía y esfuerzo para satisfacer su apetito. Al tener cámaras vigilando constantemente estas poses, el granjero no necesita salir al campo a medir o pesar el pasto manualmente. Si el sistema detecta que el porcentaje de gallinas en "postura de forrajeo activo" sube por encima de lo normal en una parcela, lanza una alerta advirtiendo que el forraje se está agotando. Esto permite implementar un

sistema de rotación perfecto, moviendo a las aves a pasto fresco en el momento ideal, garantizando que los animales no pasen hambre y que la tierra no sufra por sobrepastoreo. La figura 2 representa un bosquejo de este sistema de rotación alimentaria.

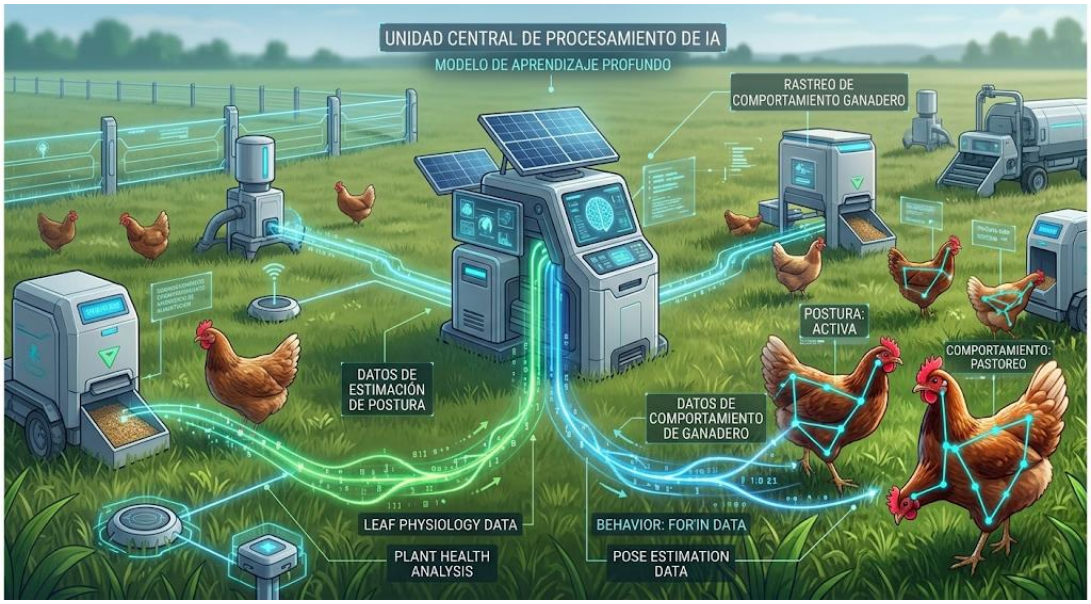


Figura 2. Estimación de pose para optimización del pastoreo.

4. Inteligencia artificial: El cerebro detrás del láser y las cámaras.

Ya sea que estemos capturando el espectro de colores invisibles que rebota de una hoja de Neem o analizando los puntos clave de la postura de cientos de gallinas, estamos generando millones de datos por segundo. El cerebro que da sentido a esta información es la Inteligencia Artificial (IA). Los modelos matemáticos (como las redes neuronales de retropropagación) aprenden a reconocer patrones en los datos crudos. En el laboratorio, la IA compara el espectro láser con historiales de hojas sanas y enfermas para diagnosticar qué contaminante específico está afectando a la planta. En el campo, procesa el video para filtrar sombras, reflejos o cruces entre las aves, logrando una precisión milimétrica en la identificación de la postura. La integración de estos algoritmos convierte a los sensores optomecatrónicos en verdaderos "asesores virtuales" capaces de tomar decisiones autónomas para el bienestar agroecológico.

Conclusiones.

La optomecatrónica está derribando las barreras de lo que podemos gestionar en la agricultura. Entender que el estrés de las plantas se manifiesta en un sutil cambio del brillo de su clorofila nos ha permitido desarrollar protocolos de análisis LIF en laboratorio, asegurando diagnósticos precisos sin interferencias climáticas. Gracias a esto, podemos proteger reservas naturales vitales como el árbol de Neem (Azadirachta indica) ante la toxicidad urbana. De forma paralela, el uso de cámaras inteligentes con estimación de pose nos permite comprender la salud de un ecosistema entero simplemente interpretando las posturas de pastoreo de las gallinas, evitando la degradación del suelo y optimizando la nutrición animal. Estamos entrando a una era donde el cuidado de la naturaleza se apoya en la precisión tecnológica, fusionando el mundo microscópico de la fluorescencia vegetal y la dinámica visual del comportamiento animal para asegurar un futuro más verde y productivo.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto a través de la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos PRODEP 2023.

Referencias bibliográficas.

Guo, Ning, Baohua Zhang, Jun Zhou, Ketian Zhan, and Shuang Lai. (2020) *Pose Estimation and Adaptable Grasp Configuration with Point Cloud Registration and Geometry Understanding for Fruit Grasp Planning.* Computers and Electronics in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105818.

Legendre, Reeve, Nicholas T. Basinger, and Marc W. van Iersel. (2021) *Low-Cost Chlorophyll Fluorescence Imaging for Stress Detection.* Sensors 21, no. 6: 2055. https://doi.org/10.3390/s21062055.

Lei, Bo, Zhong-hua Bian, Qi-chang Yang. (2018) *The Positive Function of Selenium Supplementation on Reducing Nitrate Accumulation in Hydroponic Lettuce (Lactuca Sativa L.).* Journal of Integrative Agriculture 17, no. 4: 837–46. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61759-3.

Pérez-Patricio, Madaín, Jorge Luis Camas-Anzueto, Avisaí Sanchez-Alegría (2018) *Optical Method for Estimating the Chlorophyll Contents in Plant Leaves.* Sensors 18, no. 2: 650. https://doi.org/10.3390/s18020650.

Waldmann, Urs, Alex Hoi Hang Chan, Hemal Naik. (2024) *3D-MuPPET: 3D Multi-Pigeon Pose Estimation and Tracking.* International Journal of Computer Vision 132, no. 10: 4235–52. https://doi.org/10.1007/s11263-024-02074-y.

Zhang, Xin, Dongxian He, Genhua Niu, Zhengnan Yan, and Jinxiu Song. (2018) *Effects of Environment Lighting on the Growth, Photosynthesis, and Quality of Hydroponic Lettuce in a Plant Factory.* International Journal of Agricultural and Biological Engineering, no. 2: 2. Mechanization. https://doi.org/10.25165/ijabe.v11i2.3420.

Información de los autores.



Madaín Pérez Patricio es graduado como Doctor en Ciencias en Automatización y Computación Industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador y Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro del Claustro Doctoral "Doctorado en Ciencias de la Ingeniería" perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad, I.T. de Tuxtla Gutiérrez desde 2016. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II.



Abiel Aguilar González es Investigador postdoctoral en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), con dos doctorados en Ciencias Computacionales y Electrónica y Sistemas. Especialista en visión por computadora, inteligencia artificial y cómputo embebido, con aplicaciones en vehículos autónomos, metrología y sistemas en tiempo real. Fue galardonado con el Best Paper Award en la ICDSC 2016, en París, Francia, y seleccionado para la beca Eiffel del gobierno francés en 2017. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1, y participó en el desarrollo del módulo MBT de PolyWorks AR. Cuenta con 15 publicaciones JCR, 263 citas y un índice h de 8. Es Editor Asociado del Journal of Real-Time Image Processing (Springer) y ha realizado 291 revisiones por pares. Su trayectoria incluye docencia, dirección de tesis de posgrado, evaluación de proyectos internacionales, colaboración editorial con Pearson México y actividades de divulgación científica.



Juan Antonio de Jesús Osuna Coutiño es profesos de tiempo completo en la escuela de tecnologías de la UNACH en las carreras de Inteligencia artificial. Además, es Doctor egresado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica y un título en Ingeniería Industrial por el Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Áreas de investigación son el procesamiento de imágenes, el aprendizaje profundo y la implementación de modelos transformadores. Actualmente, mi enfoque se dirige a la automatización del monitoreo agrícola, con el objetivo de fortalecer la soberanía alimentaria mediante tecnologías avanzadas. Como estudiante, en 2016 desarrollé una metodología para aplicaciones de Realidad Aumentada, presentada en la conferencia internacional más destacada en esta área a nivel mundial (ISMAR). En 2017, expuso un algoritmo de odometría visual basado en flujo óptico en la Universidad de Stanford (ICDSC). Ha trabajado en la traducción y revisión de libros para Pearson México. Finalmente, he participado en charlas de divulgación en YouTube (IA que volará tu cabeza Dr. Antonio O pepe&chema), alcanzando más de 440,000 visualizaciones.



Ernesto Alonso Ocaña Valenzuela es Doctor en Ingeniería Aplicada por el Colegio Tenam de Tuxtla Gutierrez, Chiapas. Es profesor investigador de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco desde el 2008, perteneciente a la academia de Ingeniería Mecatrónica. Es perfil deseable Prodep desde el año 2023 y líder del cuerpo académico “Soluciones Electrónicas y Mecatrónicas para el Industria”.

Óptica y polarimetría para la caracterización de materiales.

Optics and polarimetry for material characterization.

Guadalupe López Morales* (1).
Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
gpelopezmorales12@gmail.com.

Héber Vilchis (2). Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. heber.vilchis@unicach.mx.

Yuliana M. Espinosa Sánchez (3). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, México. yuliana.espinosa@unach.mx.

Ariel Flores Rosas (4). Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas, Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, México. ariel.flores@unach.mx.

María del Mar Sánchez López (5). Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Elche, España. mar.sanchez@umh.es.

Ignacio Moreno (6). Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, Elche, España. i.moreno@umh.es.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 10, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Primer Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2022.

Resumen.

La óptica ofrece herramientas poderosas para estudiar materiales mediante luz. Entre ellas, la polarimetría y la espectroscopía permiten analizar cómo cambia la luz al atravesar distintos objetos, revelando información sobre su composición, estructura, parámetros ópticos y humedad. Estas técnicas se aplican incluso en alimentos deshidratados, donde la luz ayuda a evaluar su calidad, su proceso de secado y características internas difíciles de observar por otros métodos. También se emplean para estudiar metales, plásticos, cristales y estructuras naturales, ampliando las posibilidades de caracterización no invasiva. La información presentada en este trabajo resume diversas aplicaciones experimentales desarrolladas en el campo de la óptica moderna. Estos resultados muestran cómo la luz impulsa tecnologías de imagen, sensores avanzados, pantallas y sistemas de control de calidad presentes en la vida cotidiana.

Palabras claves: Espectroscopia infrarroja, matriz de Mueller, óptica, polarimetría, secado de alimentos.

Abstract.

Optics provides powerful tools for studying materials through light. Among them, polarimetry and spectroscopy make it possible to analyze how light changes as it passes through different objects, revealing information about their

composition, structure, optical parameters, and moisture content. These techniques are applied even to dehydrated foods, where light helps evaluate their quality, drying process, and internal characteristics that are difficult to observe by other methods. They are also used to study metals, plastics, crystals, and natural structures, expanding the possibilities of non-invasive characterization. The information presented in this work summarizes various experimental applications developed in modern optics. These results show how light drives imaging technologies, advanced sensors, displays, and quality-control systems present in everyday life.

Keywords: Food drying, infrared spectroscopy, Mueller matrix, optics, polarimetry.

1. Descripción de la conferencia.

La óptica moderna se ha convertido en una herramienta fundamental para estudiar la interacción entre la luz y la materia. A través de técnicas como la polarimetría y la espectroscopía, es posible obtener información detallada sobre propiedades físicas, químicas y estructurales de materiales naturales y procesados. Estas metodologías permiten analizar sistemas complejos sin necesidad de intervenirlos, lo que las convierte en alternativas valiosas para la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

La polarimetría, basada en los parámetros de Stokes y la matriz de Mueller, ofrece una descripción precisa de cómo los materiales modifican el estado de polarización de la luz. Este enfoque ha sido aplicado en el estudio de la dispersión en cilindros metálicos, donde se generan patrones de polarización que revelan características ópticas específicas (Saucedo-Orozco, López-Morales & Espinosa-Luna, 2014). También ha permitido evaluar elementos ópticos, como polarizadores con una distribución espacial de su eje de transmisión (polarizadores espaciales) moduladores de cristal líquido, mediante técnicas de imagen polarimétrica (López-Morales et al., 2020; Nabadda et al., 2022; Marco et al., 2021).

De manera adicional, la óptica ha demostrado su capacidad para caracterizar materiales naturales con estructuras complejas. Un ejemplo es el análisis micropolarimétrico de la cutícula del escarabajo *C. mutabilis*, donde se identifican propiedades de polarización circular asociadas a la microestructura del exoesqueleto (Muñoz-Pineda, López-Morales & Espinosa-Luna, 2019). Este tipo de estudios evidencia cómo la luz puede revelar información biológica que no es accesible mediante métodos convencionales (He et al., 2019).

Además de la polarimetría, la espectroscopía ha adquirido un papel central en la evaluación de materiales orgánicos e inorgánicos. Técnicas como espectroscopia de absorción infrarroja cercano (NIR), Raman, Espectroscopia infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), fluorescencia y Terahertz (THz) permiten identificar compuestos, evaluar estructuras moleculares y determinar parámetros ópticos relevantes. Su aplicación en productos agrícolas deshidratados ha generado avances significativos en el análisis de humedad, nutrientes y compuestos bioactivos. Investigaciones recientes han demostrado que la luz puede emplearse para monitorear el proceso de secado de alimentos y evaluar su calidad de manera no invasiva. Se han determinado niveles de humedad y nutrientes en productos agrícolas deshidratados mediante espectroscopía (López-Morales, Quevedo-Jiménez & Vilchis, 2022). En el caso del mamey (*Pouteria sapota*), la espectroscopía ha permitido detectar la relación de humedad y la presencia de carotenoides durante la deshidratación (López-Morales et al., 2023). El análisis espectral también ha sido aplicado al estudio de las propiedades dieléctricas de compuestos de *Pouteria sapota* en el rango de THz, proporcionando información sobre su comportamiento electromagnético y su interacción con radiación de alta frecuencia (Vilchis et al., 2024). Estos resultados complementan la caracterización óptica y abren nuevas posibilidades para el desarrollo de sensores basados en THz. Más recientemente, sensores basados en interferometría multimodo (MMI) han demostrado su capacidad para detectar el contenido de humedad en mango y papaya durante el secado, ofreciendo una alternativa compacta y eficiente para monitoreo en tiempo real (López-Morales et al., 2025). Este tipo de dispositivos representa un avance importante hacia la implementación de tecnologías ópticas en la industria alimentaria.

Los avances en polarimetría y espectroscopía muestran cómo la óptica moderna permite comprender y evaluar materiales fotónicos y naturales. Estas técnicas impulsan el desarrollo de sensores inteligentes, tecnologías de imagen, sistemas de control de calidad y aplicaciones industriales que impactan directamente en la vida cotidiana.

2. Métodos.

A partir de las aplicaciones y casos de estudio descritos en la sección anterior, se estableció un conjunto de técnicas ópticas no invasivas que permiten analizar de manera cuantitativa las propiedades físicas, estructurales y espectrales de los materiales estudiados. Estas técnicas fueron seleccionadas por su capacidad para revelar información que no es accesible mediante métodos convencionales y por su pertinencia en el estudio de materiales naturales, dispositivos fotónicos y productos agrícolas deshidratados. En esta sección se describen los fundamentos teóricos y los procedimientos experimentales empleados para la caracterización polarimétrica y espectroscópica.

2.1 Fundamentos de polarimetría: parámetros de Stokes y matriz de Mueller

La polarimetría es una técnica óptica que permite describir y cuantificar cómo un material modifica el estado de polarización de la luz. Su fundamento matemático se basa en los parámetros de Stokes y en la matriz de Mueller (Goldstein, 2010), herramientas ampliamente utilizadas en la caracterización de materiales naturales, dispositivos ópticos y estructuras biológicas (López-Morales et al., 2020; Marco et al., 2021; Muñoz-Pineda et al., 2019).

El estado de polarización de un haz de luz se representa mediante el vector de Stokes, definido como $\boldsymbol{S} = (\boldsymbol{S_0}\ \boldsymbol{S_1}\ \boldsymbol{S_2}\ \boldsymbol{S_3})^{\boldsymbol{T}}$, donde $\boldsymbol{S_0}$ corresponde a la intensidad total del haz y $\boldsymbol{S_1}$, $\boldsymbol{S_2}$ y $\boldsymbol{S_3}$ es la diferencia entre intensidades de polarización horizontal ($\boldsymbol{I_H}$) y vertical ($\boldsymbol{I_V}$), a +45° ($\boldsymbol{I_{+45}}$) y –45° ($\boldsymbol{I_{-45}}$) y de polarización circular derecha ($\boldsymbol{I_R}$) e izquierda ($\boldsymbol{I_L}$), respectivamente. Estos parámetros se obtienen mediante mediciones de intensidad con diferentes configuraciones de polarizadores y retardadores. En estudios como los de López-Morales et al. (2014, 2020), la reconstrucción de los parámetros de Stokes permitió analizar materiales como ámbar, polarizadores espaciales y moduladores de cristal líquido.

La interacción de la luz polarizada con un material se describe mediante la matriz de Mueller, una matriz real de 4×4 que transforma el vector de Stokes incidente en el vector emergente que se muestra en la ecuación (1), (2):

$$\boldsymbol{S}_{\text{salida}} = \boldsymbol{M}\,\boldsymbol{S}_{\text{entrada}} \tag{1}$$

donde:

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{m_{00}} & \boldsymbol{m_{01}} & \boldsymbol{m_{02}} & \boldsymbol{m_{03}} \\ \boldsymbol{m_{10}} & \boldsymbol{m_{11}} & \boldsymbol{m_{12}} & \boldsymbol{m_{13}} \\ \boldsymbol{m_{20}} & \boldsymbol{m_{21}} & \boldsymbol{m_{22}} & \boldsymbol{m_{23}} \\ \boldsymbol{m_{30}} & \boldsymbol{m_{31}} & \boldsymbol{m_{32}} & \boldsymbol{m_{33}} \end{pmatrix} \tag{2}$$

Cada elemento de la matriz está asociado a propiedades físicas del material:

- La diatenuación describe la capacidad de un material para transmitir la luz de manera diferente según su estado de polarización, ya sea lineal, circular o elíptico. Se define como la diferencia relativa entre las transmisiones de dos estados ortogonales de polarización, y están dados por los elementos de la primera fila de la matriz *M*: $\boldsymbol{D} = \sqrt{\boldsymbol{m_{01}^2} + \boldsymbol{m_{02}^2} + \boldsymbol{m_{03}^2}}$. La diatenuación es fundamental para caracterizar polarizadores espaciales, materiales anisotrópicos y estructuras biológicas, como se ha demostrado en estudios de moduladores de cristal líquido (Nabadda et al., 2022) y en análisis polarimétricos de materiales naturales (López-Morales et al., 2020).

- La retardancia cuantifica el desfase que un material introduce entre dos componentes ortogonales del campo eléctrico de la luz. Este desfase está asociado a la birrefringencia, es decir, a la diferencia de índices de refracción para distintas direcciones de polarización. Se calcula mediante el análisis de los elementos del subbloque 3×3, sin considerar los elementos de la primera fila y columna de la matriz *M*. La retardancia es clave para analizar moduladores de cristal líquido, placas retardadoras y materiales con anisotropía estructural.

- La despolarización mide la capacidad de un material para reducir el grado de polarización de la luz incidente. Un material despolarizante transforma un haz inicialmente polarizado en uno parcialmente o totalmente no polarizado debido a dispersión múltiple, heterogeneidad interna o desorden estructural. El índice de despolarización **Δ** se obtiene a partir de la matriz de Mueller mediante la ecuación (3):

$$\mathbf{\Delta = 1 - \frac{\sqrt{m_{11}^2 + m_{22}^2 + m_{33}^2}}{m_{00}}} \tag{3}$$

La despolarización es especialmente relevante en materiales biológicos y naturales, donde la microestructura genera dispersión compleja. Esto ha sido demostrado en estudios micropolarimétricos de la cutícula del escarabajo *C. mutabilis* (Muñoz-Pineda et al., 2019) y en análisis de ámbar de Chiapas (López-Morales, Espinosa-Luna & Frausto-Reyes, 2014).

2.2 Medición de los parámetros polarimétricos.

Para la caracterización polarimétrica se emplearon los parámetros de Stokes y la matriz de Mueller, los cuales describen de manera completa el estado de polarización de la luz y sus transformaciones al atravesar un material. La medición de los parámetros de Stokes se realizó mediante la reconstrucción del estado de polarización de la luz a partir de intensidades registradas bajo diferentes configuraciones de análisis. Este método, ampliamente utilizado en la caracterización de materiales ópticos, biológicos y naturales (López-Morales et al., 2020; Marco et al., 2021; Muñoz-Pineda et al., 2019), se fundamenta en la interacción controlada entre la luz polarizada y la muestra, seguida de la detección precisa de las variaciones en la intensidad transmitida o reflejada. El sistema experimental de un polarímetro está formado por un generador de polarización (PSG), la muestra en estudio, un analizador de estados de polarización (PSA) y un detector, como se muestra en la figura 1.

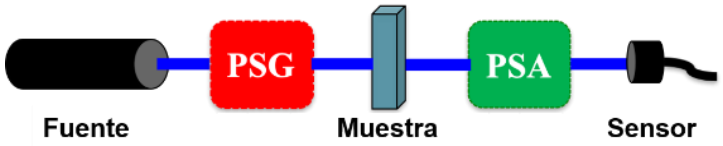


Figura 1. Diagrama de un polarímetro.
PSG y PSA: generador y analizador de estados de polarización, respectivamente.

El PSG incluyó un polarizador lineal y un retardador de onda, elementos que permitieron producir estados de polarización bien definidos, tales como polarización horizontal, vertical, lineal a ±45° y circular derecha e izquierda. En estudios que requieren control dinámico, como la caracterización de moduladores de cristal líquido, se emplearon moduladores espaciales o dispositivos de cristal líquido para ajustar la polarización de manera programada (Nabadda et al., 2022). La muestra se colocó en la trayectoria del haz, manteniendo una geometría fija de incidencia para garantizar la reproducibilidad de las mediciones. El PSA consistió en un polarizador lineal y, cuando fue necesario, un retardador λ/4 para distinguir componentes circulares. La luz transmitida o reflejada por la muestra puede ser registrada mediante un fotodetector o una cámara CCD o CMOS, que permite obtener intensidades con alta sensibilidad espacial.

Para cada estado de polarización incidente se midieron las intensidades correspondientes a las configuraciones del analizador, obteniéndose así los valores necesarios para calcular los parámetros de Stokes. Las intensidades registradas se combinaron mediante relaciones lineales clásicas: $\boldsymbol{S_0 = I_H + I_V}$, $\boldsymbol{S_1 = I_H - I_V}$, $\boldsymbol{S_2 = I_{+45} - I_{-45}}$ y $\boldsymbol{S_3 = I_R - I_L}$.

Una vez obtenidos los parámetros de Stokes, se aplicaron procedimientos de normalización y corrección de ruido instrumental para asegurar que los valores representaran exclusivamente la respuesta óptica de la muestra. Este proceso incluyó la compensación de variaciones en la intensidad de la fuente, la eliminación de artefactos de la cámara y la estabilización de las mediciones mediante promedios temporales. El resultado final fue un vector de Stokes que describe completamente el estado de polarización emergente y que constituye la base para la reconstrucción de la matriz de Mueller.

La medición de la matriz de Mueller se realizó mediante un sistema polarimétrico que permite determinar cómo un material transforma el estado de polarización de la luz incidente. Este procedimiento consiste en generar un conjunto de estados de polarización conocidos, hacerlos interactuar con la muestra y analizar la luz emergente mediante diferentes configuraciones del analizador. La matriz de Mueller resultante describe completamente la respuesta óptica del material, incluyendo diatenuación, retardancia y despolarización.

Partiendo de los elementos de un polarímetro mostrado en la figura 1, formado por dos módulos principales, el PSG y PSA, colocados antes y después de la muestra, respectivamente. El PSG incluyó un polarizador lineal y un retardador de onda que permitieron producir cuatro estados de polarización independientes, necesarios para la reconstrucción de la matriz. Estos estados se seleccionaron de manera que abarcaran polarización lineal horizontal, vertical, lineal a ±45° y circular derecha e izquierda. La muestra se iluminó secuencialmente con cada uno de estos estados, manteniendo una geometría fija de incidencia para asegurar la reproducibilidad de las mediciones. En estudios que requieren control espacial o dinámico, como la caracterización de moduladores de cristal líquido, se emplearon retardadores de cristal líquido para ajustar la polarización de manera programada (Nabadda et al., 2022).

El PSA se configuró de manera análoga al generador, utilizando un retardador λ/4 seguido de un polarizador lineal para seleccionar los estados de polarización emergentes. Para cada estado generado en el módulo de entrada, se registraron las intensidades transmitidas bajo cuatro configuraciones del analizador, obteniendo así un conjunto de dieciséis mediciones independientes. Estas intensidades se capturaron mediante un fotodetector o una cámara CCD o CMOS de alta sensibilidad, lo que permitió obtener información espacial detallada de la respuesta polarimétrica del material. Este enfoque ha sido utilizado en la caracterización de polarizadores espaciales y elementos ópticos para la generación de haces vectoriales (López-Morales et al., 2020), así como en el análisis micropolarimétrico de estructuras biológicas como la cutícula del escarabajo *C. mutabilis* (Muñoz-Pineda et al., 2019).

La matriz de Mueller se reconstruyó mediante la combinación lineal de las intensidades medidas, siguiendo el formalismo clásico de la polarimetría. Cada elemento de la matriz se obtuvo a partir de las relaciones entre los parámetros de Stokes incidentes y emergentes, de acuerdo con la ecuación $\boldsymbol{S}_{\text{salida}} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{S}_{\text{entrada}}$. Para garantizar la estabilidad numérica del proceso, se aplicaron algoritmos de corrección de ruido, normalización y calibración instrumental, los cuales compensaron variaciones en la fuente de luz, imperfecciones de los polarizadores y desviaciones en los retardadores. Este procedimiento permitió obtener matrices de Mueller físicamente consistentes, adecuadas para la descomposición polarimétrica y el análisis de propiedades ópticas como diatenuación, retardancia y despolarización.

Finalmente, la matriz de Mueller obtenida se sometió a un análisis de descomposición polarimétrica para identificar las propiedades intrínsecas del material. Este análisis permitió distinguir entre contribuciones puramente anisotrópicas, efectos de absorción dependientes de la polarización y procesos de despolarización asociados a heterogeneidad interna. La metodología empleada ha demostrado ser eficaz para caracterizar materiales naturales como ámbar (López-Morales, Espinosa-Luna & Frausto-Reyes, 2014), dispositivos fotónicos avanzados (Marco et al., 2021) y moduladores ópticos de cristal líquido (Nabadda et al., 2022), proporcionando una descripción completa de la interacción luz-materia en los sistemas estudiados.

La polarización también se empleó para determinar el índice de refracción ($\boldsymbol{n}$) de materiales transparentes mediante la medición del ángulo de Brewster. Este método se fundamenta en que, cuando un haz de luz linealmente polarizado incide sobre una superficie dieléctrica, existe un ángulo específico en el cual la reflexión de la componente paralela al plano de incidencia se reduce a cero. Dicho ángulo, conocido como ángulo de Brewster, se relaciona directamente con el índice de refracción del material mediante la expresión $\boldsymbol{n} = \tan(\boldsymbol{\theta_B})$. En el procedimiento experimental, se utilizó un haz de luz polarizada linealmente y se registró la intensidad reflejada mientras se variaba el ángulo de incidencia, identificando el mínimo de reflexión correspondiente a la componente paralela. Este enfoque ha sido ampliamente documentado en estudios de caracterización óptica de materiales dieléctricos, donde la medición precisa de $\boldsymbol{\theta_B}$permite obtener valores confiables del índice de refracción (López-Morales et al., 2017). Este método permitió la determinación del ángulo de Brewster como una técnica robusta y no invasiva para caracterizar superficies y materiales naturales como el ámbar, permitiendo distinguir variaciones en composición y estructura interna mediante análisis polarimétrico (Espinosa-Luna et al., 2014).

2.3 Técnicas espectroscópicas aplicadas a materiales y alimentos.

La caracterización espectroscópica de los materiales estudiados se llevó a cabo mediante técnicas complementarias que abarcan distintos rangos del espectro electromagnético, permitiendo identificar firmas ópticas asociadas a la composición química, la estructura molecular y las propiedades dieléctricas. La espectroscopía de absorción NIR se empleó para analizar la interacción de la luz con materiales que presentan transiciones electrónicas y bandas de absorción características. Esta técnica resultó especialmente útil en el estudio de productos agrícolas deshidratados, debido a que la absorción en el NIR se relaciona directamente con el contenido de agua, lo que permite evaluar el proceso de secado mediante cambios en las bandas asociadas a vibraciones de O–H.

La espectroscopía Raman se utilizó para identificar vibraciones moleculares específicas en materiales orgánicos y alimentos. Esta técnica permitió detectar compuestos bioactivos como carotenoides en mamey durante su deshidratación, mediante la presencia de bandas intensas asociadas a enlaces C=C y C–C en estructuras poliinsaturadas (López-Morales et al., 2023). La sensibilidad del Raman a cambios estructurales lo convierte en una herramienta eficaz para monitorear transformaciones químicas durante el secado, así como para diferenciar materiales naturales con microestructuras complejas.

La espectroscopía FTIR complementó el análisis molecular mediante la identificación de grupos funcionales presentes en los materiales. En alimentos deshidratados, las bandas de absorción en el infrarrojo medio permitieron cuantificar la presencia de agua, carbohidratos y compuestos orgánicos mediante vibraciones de O–H, C–H y C=O. Esta técnica ha demostrado ser fundamental para evaluar la pérdida de humedad y los cambios estructurales asociados al proceso de secado, proporcionando información que complementa la obtenida mediante Raman y absorción NIR.

La espectroscopía de fluorescencia se empleó para analizar la emisión óptica de materiales orgánicos bajo excitación específica, con especial énfasis en la identificación de muestras de ámbar genuino. El ámbar, al ser una resina fósil con composición química compleja, presenta características de fluorescencia que permiten distinguirlo de imitaciones sintéticas o resinas modernas. Bajo excitación en el rango ultravioleta, el ámbar auténtico exhibe una emisión característica que suele ubicarse en la región del azul-verdoso, atribuida a la presencia de compuestos aromáticos oxigenados formados durante su proceso de fosilización. Esta respuesta fluorescente ha sido reportada en estudios de caracterización óptica del ámbar de Chiapas, donde la emisión permite diferenciar muestras genuinas de materiales artificiales que presentan espectros de fluorescencia más intensos, desplazados o carentes de las bandas asociadas a la estructura química del ámbar natural (López-Morales, Espinosa-Luna & Frausto-Reyes, 2014).

La espectroscopía en el rango de terahercios (THz) se utilizó para determinar propiedades dieléctricas e índice de refracción complejo en materiales como *Pouteria sapota*, proporcionando información sobre su interacción con radiación de alta frecuencia (Vilchis et al., 2024). La respuesta THz es altamente sensible a la presencia de agua, lo que permite evaluar humedad residual y cambios en la estructura interna del material. Esta técnica complementa el análisis óptico al ofrecer una perspectiva electromagnética que revela propiedades no accesibles mediante métodos en el visible o infrarrojo.

Finalmente, se integró un sistema de detección basado en fibra óptica mediante interferometría multimodo (MMI), el cual permitió medir el contenido de humedad en mango y papaya durante el secado (López-Morales et al., 2025). Este sensor consiste en una fibra óptica con guía multimodo cuya respuesta espectral cambia en función del índice de refracción del entorno inmediato, el cual se ve afectado por la cantidad de agua presente en la muestra. La variación en la posición de los máximos de interferencia se correlacionó con el contenido de humedad, permitiendo realizar mediciones en tiempo real de manera compacta, robusta y no invasiva. La integración de este sensor óptico representa un avance significativo hacia el desarrollo de tecnologías de monitoreo continuo en procesos de deshidratación de alimentos.

2.4 Preparación de muestras y adquisición de datos.

Las muestras analizadas incluyeron materiales ópticos, estructuras biológicas, resinas fósiles como ámbar y productos agrícolas deshidratados. En el caso de los alimentos, se seleccionaron frutas como mamey, mango y papaya, las cuales fueron sometidas a procesos de secado controlado en condiciones reproducibles. Cada fruta se preparó mediante cortes

uniformes de espesor constante para asegurar homogeneidad en la interacción óptica y térmica. Posteriormente, las muestras se mantuvieron bajo condiciones estandarizadas de temperatura, humedad relativa y flujo de aire, registrando continuamente las variables ambientales para garantizar la estabilidad del proceso de deshidratación. En el caso del ámbar y otros materiales naturales, las muestras se limpiaron y montaron cuidadosamente para evitar contaminación superficial que pudiera alterar las mediciones espectrales o polarimétricas.

Los protocolos de medición se diseñaron para asegurar consistencia en la iluminación, la geometría de incidencia y los parámetros de adquisición. Se controlaron variables como el tiempo de exposición, la longitud de onda de la fuente, la resolución espectral del sistema y las condiciones ambientales del laboratorio. Para cada técnica óptica se establecieron configuraciones específicas: en polarimetría se fijaron los ángulos de polarizadores y retardadores; en espectroscopía se calibraron las fuentes y detectores; y en fluorescencia se ajustaron los niveles de excitación para evitar saturación. En el caso de los alimentos deshidratados, se documentaron el tiempo total de secado, la pérdida de masa en intervalos regulares y la evolución del contenido de humedad mediante métodos ópticos y gravimétricos. Para las muestras de ámbar, se registraron variaciones en absorción, fluorescencia y polarización asociadas a su composición y autenticidad. El procesamiento de datos incluyó normalización espectral, corrección de ruido instrumental, eliminación de artefactos y ajuste de curvas mediante algoritmos de regresión. Se extrajeron características relevantes como posiciones de picos espectrales, intensidades relativas, parámetros polarimétricos y firmas ópticas específicas de cada material. En el análisis polarimétrico se aplicaron métodos de descomposición de la matriz de Mueller para obtener parámetros físicos asociados a la estructura interna de los materiales, tales como diatenuación, retardancia y despolarización, lo que permitió identificar anisotropías, heterogeneidad y cambios estructurales durante el secado.

3. Desarrollo.

Los resultados obtenidos mediante las técnicas ópticas aplicadas permitieron caracterizar de manera integral los materiales estudiados, incluyendo ámbar genuino, estructuras biológicas, materiales ópticos y productos agrícolas deshidratados. La combinación de polarimetría y espectroscopía proporcionó información complementaria sobre la estructura interna, composición química y propiedades dieléctricas de cada muestra, revelando diferencias significativas entre materiales naturales y procesados, así como cambios asociados al proceso de secado en frutas como mamey, mango y papaya.

3.1 Caracterización por polarimetría.

La caracterización polarimétrica permitió analizar de manera detallada la interacción entre la luz polarizada y los materiales estudiados, proporcionando información sobre anisotropía, despolarización y propiedades ópticas intrínsecas.

Entre los resultados más relevantes se encuentra la determinación del índice de refracción de materiales naturales como el ámbar y de muestras dieléctricas mediante técnicas basadas en polarización. Este enfoque se fundamenta en la medición del ángulo de Brewster, el cual corresponde al ángulo de incidencia en el que la componente paralela del haz reflejado se anula completamente. Dado que este ángulo se relaciona directamente con el índice de refracción ($\boldsymbol{n}$) mediante la expresión $\boldsymbol{n = \tan(\theta_B)}$, su medición precisa permite obtener valores confiables de $\boldsymbol{n}$ sin necesidad de recurrir a métodos invasivos. En el caso del ámbar de Chiapas se demostró que la medición del ángulo de Brewster constituye una herramienta eficaz para determinar su índice de refracción y, con ello, evaluar variaciones en composición y estructura interna (López-Morales, et al., 2014). Este resultado es particularmente relevante porque el ámbar es un material heterogéneo cuya composición orgánica puede variar según su origen geológico y grado de fosilización. La polarimetría permitió identificar diferencias sutiles en la respuesta óptica del ámbar genuino frente a imitaciones sintéticas, aportando criterios objetivos para su autenticación y clasificación. Por otro lado, este enfoque se extendió al estudio de materiales dieléctricos, empleando haces altamente enfocados de luz radialmente polarizada para mejorar la sensibilidad en la medición del índice de refracción (López-Morales, et al., 2017). En dicho estudio, la reflectancia se analizó a partir de imágenes que permitieron localizar con precisión el ángulo en el cual la luz reflejada se atenúa, correspondiente al ángulo de Brewster (figura 2). Este mínimo de reflexión facilitó el cálculo del índice de refracción mediante la relación $\boldsymbol{n = \tan(\theta_B)}$, obteniéndose valores que coincidieron estrechamente con los reportados

en la literatura. La metodología mostró ventajas significativas frente a técnicas convencionales, como una mayor sensibilidad angular, mejor relación señal-ruido y la capacidad de caracterizar muestras pequeñas o con geometrías complejas.

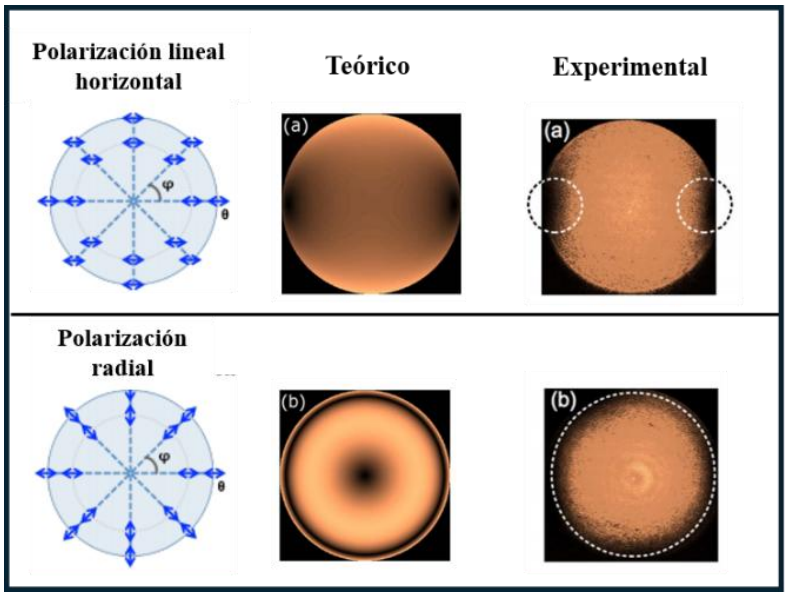


Figura 2. Determinación del ángulo de Brewster para calcular el índice de refracción en un material dieléctrico (López Morales, et al., 2017).

Por otro lado, la determinación de la matriz de Mueller permitió caracterizar de manera integral la interacción luz-materia en materiales naturales y procesados, proporcionando información sobre diatenuación, retardancia y despolarización, parámetros esenciales para comprender su estructura óptica interna. Para ello, se empleó un sistema polarimétrico de imagen basado en la generación y análisis controlados de estados de polarización, mediante el cual se registraron las imágenes de intensidades reflejadas (figura 3) y transmitidas (figura 4) bajo configuraciones específicas del generador y analizador de polarización.

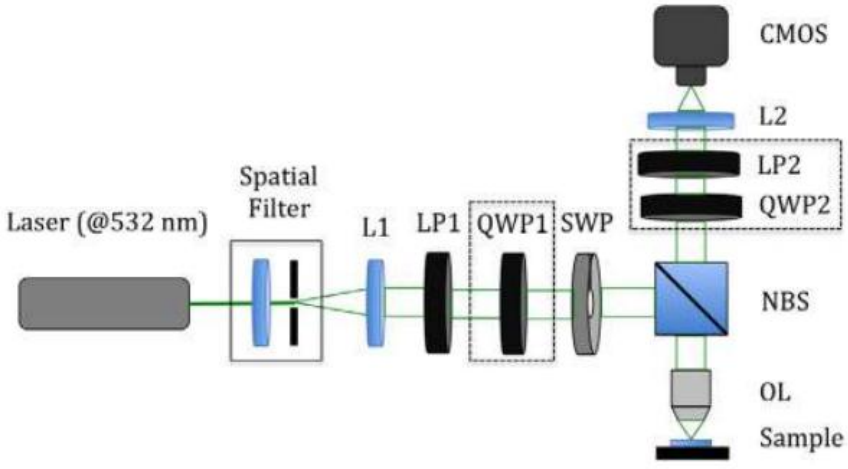


Figura 3. Esquema de un polarímetro de imágenes en modo reflexión (Muñoz Pineda, López Morales & Espinosa Luna, 2019).

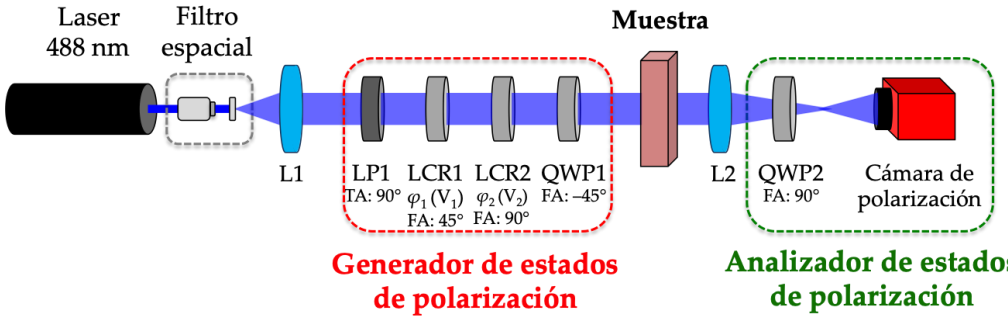


Figura 4. Esquema de un polarímetro de imágenes en modo transmisión (López-Morales et al., 2020).

Este procedimiento permitió reconstruir la matriz de Mueller completa, describiendo cómo cada material transforma el estado de polarización de la luz incidente. En materiales procesados y dispositivos fotónicos, la matriz de Mueller permitió evaluar la respuesta óptica espacial y dinámica de moduladores de cristal líquido, polarizadores espaciales y elementos birrefringentes. En moduladores de cristal líquido nemático girado (twisted-nematic), por ejemplo, la reconstrucción de la matriz de Mueller permitió identificar cómo la retardancia y la diatenuación varían con el voltaje aplicado, proporcionando una descripción precisa de su comportamiento electro-óptico y validando modelos teóricos mediante mapas experimentales de alta resolución (Nabadda et al., 2022). De manera similar, en elementos ópticos utilizados para generar haces vectoriales cilíndricos, la matriz de Mueller permitió detectar variaciones locales en anisotropía y despolarización, información crucial para optimizar la calidad de los haces radiales y azimutales empleados en microscopía avanzada y procesado láser de materiales (López-Morales et al., 2020). La figura 5 presenta la matriz de Mueller por imagen de un polarizador radial, comparando el comportamiento teórico (a) frente al experimental (b). En ambos casos se observa un porcentaje de error mínimo.

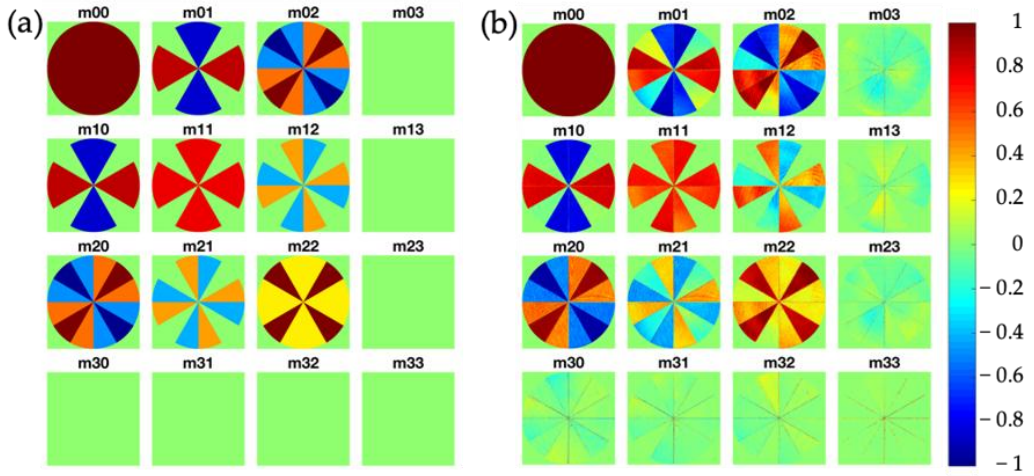


Figura 5. Matriz de Mueller por imagen de un polarizador radial (López-Morales et al., 2020).

La aplicación de esta técnica también permitió estudiar materiales biológicos con microestructuras complejas, como la cutícula del escarabajo *C. mutabilis*. La figura 6a ilustra la respuesta de la cutícula del escarabajo ante luz no polarizada; en ella se observa que dicha estructura polariza la luz de forma circular izquierda. Mediante micropolarimetría, se obtuvieron matrices de Mueller de polígonos individuales del exoesqueleto (figura 6b), revelando anisotropía óptica, birrefringencia y patrones de despolarización asociados a su estructura helicoidal natural. Estos resultados confirmaron que la cutícula funciona como un modulador óptico biológico, aportando información relevante para el diseño de materiales fotónicos inspirados en sistemas naturales (Muñoz-Pineda, López-Morales & Espinosa-Luna, 2019). La figura. 6c presenta las imágenes de un único polígono cuticular iluminado con haces de luz

de polarización radial (izquierda) y acimutal (derecha), respectivamente, en el plano de la pupila de salida del objetivo. Las flechas en los recuadros representan la dirección instantánea del campo eléctrico incidente.

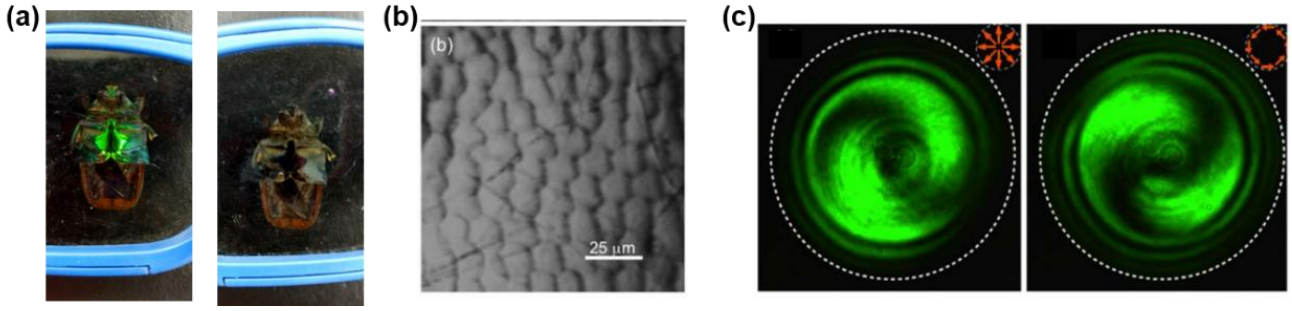


Figura 6. Análisis de la cutícula del escarabajo *C. mutabilis* por polarización (Muñoz Pineda, López Morales & Espinosa Luna, 2019).

En el estudio de la dispersión de un hilo metálico, el módulo PSA funcionó como un analizador integrado por un fotodetector encargado de registrar la intensidad del campo dispersado. En dicho trabajo se demostró que la luz dispersada por cilindros metálicos de diámetro de 254 µm presenta propiedades de polarización altamente estructuradas, determinadas por la geometría del cilindro y por la orientación del haz incidente. Mediante análisis polarimétrico se identificaron patrones característicos en los parámetros de Stokes y en la matriz de Mueller del campo dispersado, revelando zonas de polarización lineal y circular que emergen de la interacción entre la luz y la superficie metálica (Espinosa-Luna, Saucedo-Orozco & López-Morales, 2014). Estos resultados aportaron evidencia experimental sobre cómo la forma y el tamaño de objetos metálicos simples pueden generar distribuciones complejas de polarización, contribuyendo al entendimiento fundamental de los procesos de dispersión electromagnética.

En conjunto, la determinación de la matriz de Mueller en materiales naturales y procesados permitió identificar propiedades ópticas intrínsecas, evaluar heterogeneidad estructural y validar modelos físicos, demostrando la versatilidad de la polarimetría como herramienta para la caracterización avanzada de materiales en áreas que abarcan desde la fotónica y la biología hasta la industria alimentaria y la autenticación de materiales orgánicos.

3.2 Caracterización por espectroscopía.

La fluorescencia resultó especialmente útil para la identificación de ámbar genuino. Bajo excitación ultravioleta (UV), el ámbar natural exhibió una emisión azul-verdosa característica, atribuida a compuestos aromáticos oxigenados (figura 7a). Las imitaciones sintéticas mostraron emisiones carentes de esta firma óptica (figura 7b), lo que permitió establecer criterios de autenticidad basados en la forma del espectro, como se ha documentado en estudios de caracterización óptica de resinas fósiles (López-Morales et al., 2014).

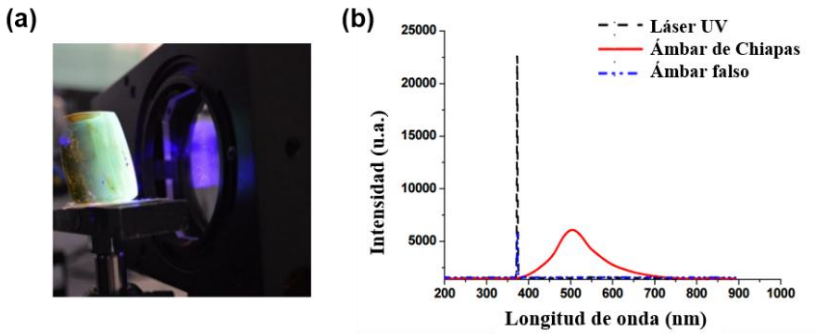


Figura 7. Respuesta óptica a luz ultravioleta (a) y espectro de emisión (b) del ámbar de Chiapas**.**

Los espectros de absorción NIR permitieron identificar firmas ópticas características en materiales naturales y alimentos. En frutas deshidratadas, las bandas NIR relacionadas con vibraciones O–H, alrededor de 1450 nm, disminuyeron progresivamente conforme avanzó el secado, permitiendo estimar el contenido de humedad mediante análisis espectral, como se ha demostrado en estudios de mamey y otras frutas tropicales (López-Morales et al., 2023). En la figura 8 se muestra el espectro NIR de rebanadas de mamey con diferente contenido de agua (MR), en donde MR= 100 % representa la fruta fresca y MR=0% a la fruta seca totalmente.

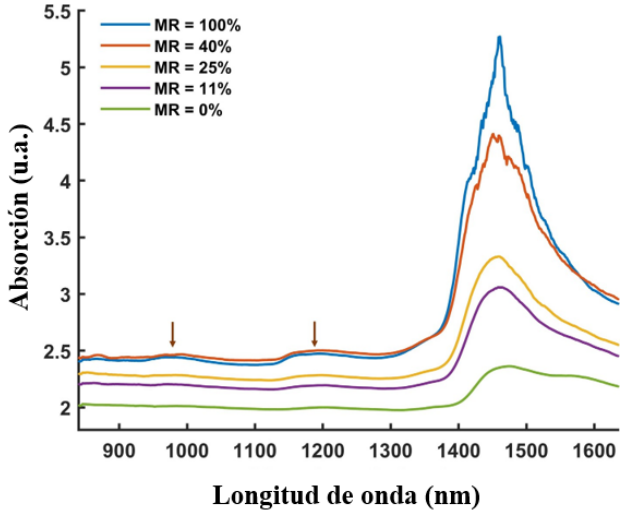


Figura 8. Espectro de absorción NIR de rebanada de mamey con diferente contenido de humedad (MR) (López-Morales et al., 2023).

La espectroscopía Raman reveló vibraciones moleculares específicas en materiales orgánicos. En rebanadas de mamey se detectaron bandas asociadas a carotenoides y otros compuestos bioactivos en el rango de 1006 cm^{-1}, 1154 cm^{-1} y 1516 cm^{-1}. En la figura 9a se observa que la intensidad aumentó ligeramente con la pérdida de agua (MR), en concordancia con estudios de deshidratación de frutas tropicales (López-Morales et al., 2023). En el ámbar, el Raman permitió identificar enlaces C–C y C=C característicos de su estructura polimérica natural, diferenciándolo de imitaciones que presentan espectros más simples o con bandas desplazadas, como se observa en la figura 9b (López-Morales et al., 2014).

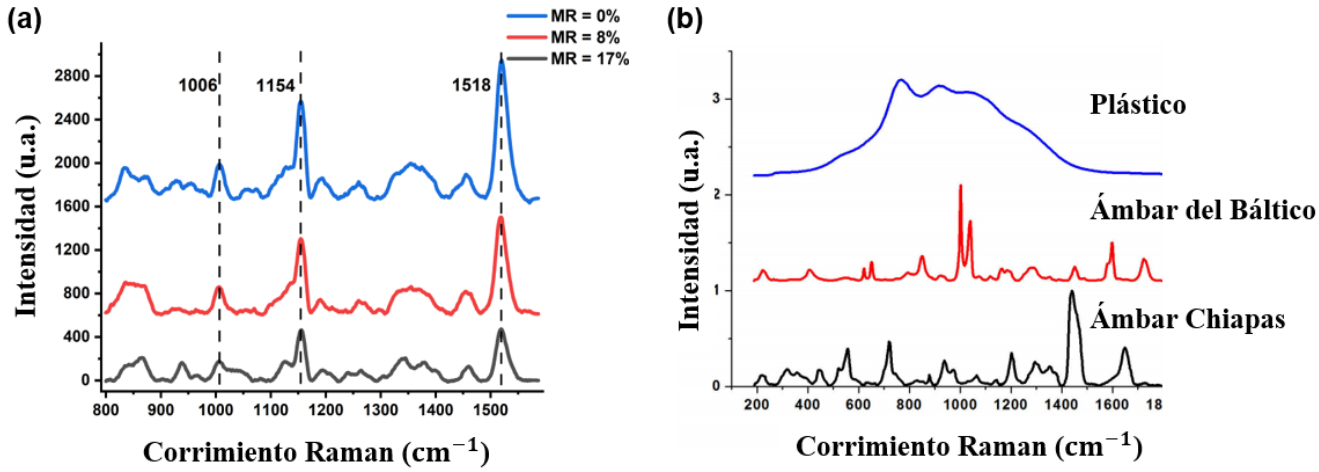


Figura 9. Espectro Raman de rebanada de mamey durante proceso de secado (a) y ámbar de Chiapas (López-Morales et al., 2023; López-Morales et al., 2014).

La espectroscopía FTIR complementó el análisis molecular mediante la identificación de grupos funcionales. En alimentos deshidratados como el mamey, las bandas de O–H, C–H y C=O mostraron cambios significativos durante el secado, reflejando transformaciones químicas y estructurales (López-Morales et al., 2023).

La espectroscopía THz permitió determinar propiedades dieléctricas en materiales como *Pouteria sapota* (figura 10a), mostrando alta sensibilidad a la presencia de agua (WC), como se observa en la figura 10b. Los espectros THz revelaron variaciones en el índice de refracción (figura 10c) y el coeficiente de absorción (figura 10d) en conforme disminuyó la humedad, proporcionando información complementaria a las técnicas ópticas convencionales (Vilchis et al., 2024). El estudio mostró que las ondas THz permiten distinguir variaciones en el contenido de agua y compuestos volátiles mediante la determinación de la función dieléctrica efectiva, la cual aumenta en su parte real e imaginaria conforme la muestra conserva mayor humedad. Al ajustar los datos experimentales al modelo de mezcla de Landau-Lifshitz-Looyenga, se logró separar la contribución de materia seca, agua y volátiles, proporcionando una caracterización más completa que la reportada previamente para otros frutos. Estos resultados evidencian que la espectroscopía THz es una técnica no destructiva, capaz de monitorear la calidad de productos agrícolas durante su deshidratación y de servir como método in situ y ex situ para control de procesos en la industria agroalimentaria, donde la preservación de nutrientes y la evaluación de humedad son factores críticos.

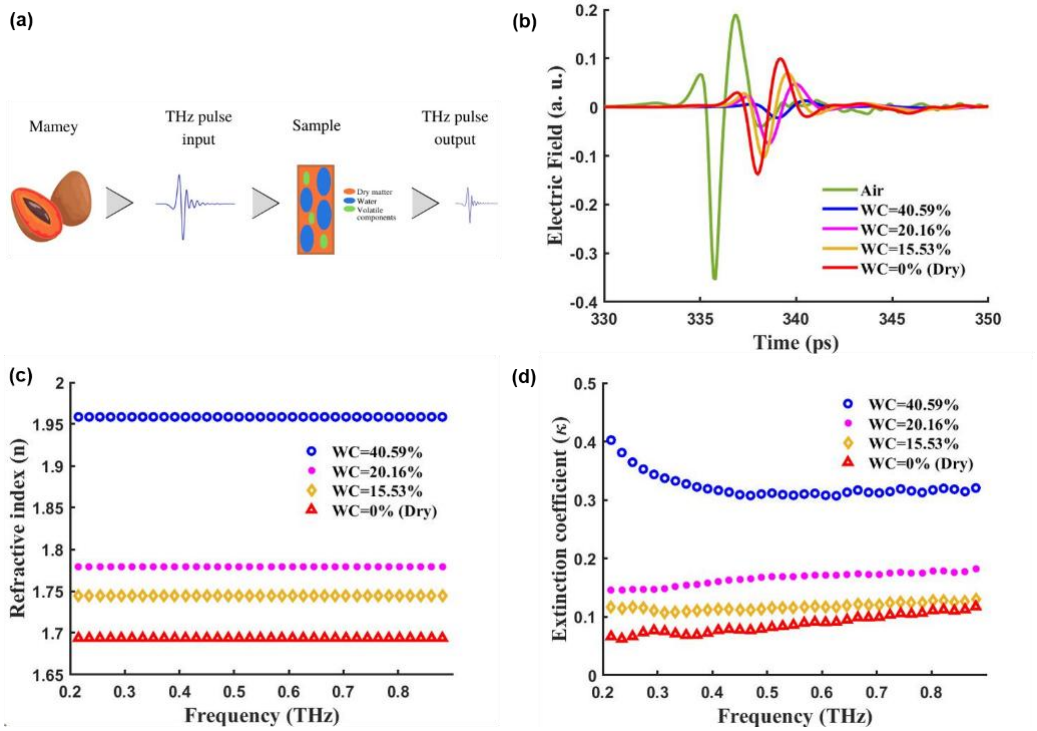


Figura 10. Espectro de rebanadas de mamey con diferente contenido de agua (WC) en el rango de terahertz.

Finalmente, el sensor de fibra óptica basado en interferometría multimodo (MMI) permitió medir el contenido de humedad en mango y papaya durante el secado. La posición de los máximos de interferencia se desplazó en función del índice de refracción del entorno, el cual depende directamente de la cantidad de agua presente. Este método demostró ser compacto, rápido y no invasivo, ideal para monitoreo en tiempo real (López-Morales et al., 2025). La figura 11 muestra la respuesta espectral de muestras de papaya con diferentes valores de contenido de humedad, obtenida con el sensor MMI con la fuente láser de 980 nm. Las muestras secas y frescas corresponden al 0% y 100%, respectivamente.

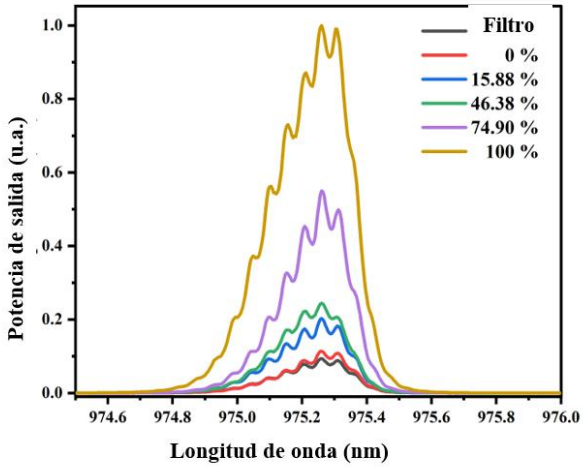


Figura 11. la respuesta espectral de muestras de papaya con diferentes valores de contenido de humedad. Las muestras secas y frescas corresponden al 0% y 100%, respectivamente

Conclusiones.

Los resultados obtenidos mediante polarimetría, matriz de Mueller y espectroscopías ópticas demostraron que estas técnicas permiten caracterizar de manera integral materiales naturales, biológicos, fotónicos y productos agrícolas procesados. La polarimetría evidenció diferencias sutiles en anisotropía, despolarización e índice de refracción, posibilitando la autenticación de ámbar, la evaluación de dispositivos ópticos avanzados y la comprensión de microestructuras biológicas como la cutícula del escarabajo *C. mutabilis*. La reconstrucción de la matriz de Mueller confirmó su utilidad para analizar la respuesta espacial y dinámica de moduladores de cristal líquido y elementos generadores de haces vectoriales, validando modelos físicos y optimizando aplicaciones en fotónica. Por su parte, las técnicas espectroscópicas como la fluorescencia, absorción NIR, Raman, FTIR y THz permitieron identificar firmas químicas, monitorear el contenido de humedad y describir transformaciones estructurales en frutas tropicales durante el secado, aportando herramientas no invasivas para control de calidad agroindustrial. En conjunto, estos trabajos fortalecen el campo de la óptica aplicada al mostrar cómo la interacción luz-materia puede emplearse para resolver problemas científicos y tecnológicos, y contribuyen socialmente al mejorar procesos de autenticación, monitoreo de alimentos y desarrollo de dispositivos fotónicos más eficientes y confiables.

Créditos.

Se agradece la colaboración de los grupos de investigación que desarrollaron los estudios citados. Se reconoce el trabajo de los autores, así como el apoyo institucional que permitió la realización de los experimentos y la integración de las técnicas ópticas aplicadas. Se extiende un agradecimiento a los laboratorios y centros de investigación que facilitaron el uso de equipos especializados para la caracterización óptica y espectroscópica. La autora GLM agradece a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, a la SECIHTI y la Universidad Miguel Hernández de Elche por el financiamiento y apoyo que se ha proporcionado a lo largo de los años para realizar la investigación presentada en este trabajo.

Referencias bibliográficas.

Espinosa-Luna, R., Saucedo-Orozco, H., & López-Morales, G. (2014). *Polarization patterns produced by light scattering from metallic cylinders.* Revista Mexicana de Física, 60(3), 217–221.

Goldstein, D. H. (2010). *Polarized Light*. Marcel Dekker.

He, H., Liao, R., Zeng, N., Li, P., Chen, Z., Liu, X., & Ma, H. (2019). *Mueller matrix polarimetry—An emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen*. Journal of Lightwave Technology, 37(11), 2534–2548.

López-Morales, G., Espinosa-Luna, R., & Frausto-Reyes, C. (2014). *Optical characterization of amber from Chiapas.* Revista Mexicana de Física, 60(3), 217–221.

López-Morales, G., López-Páez, M. F., López, P., Carriles, R., & Vilchis, H. (2023). *Detection of moisture ratio and carotenoid compounds in mamey (Pouteria sapota) fruit during dehydration process using spectroscopic techniques.* Journal of Food Science and Technology, 60(7), 1952–1959.

López-Morales, G., Quevedo-Jiménez, J. E., & Vilchis, H. (2022). *Aplicación de técnicas ópticas no invasivas para la determinación de nivel de humedad y de nutrientes en productos agrícolas deshidratados*. La Ciencia Aplicada, 9.

López-Morales, G., Rico-Botero, V. M., Espinosa-Luna, R., & Zhan, Q. (2017). *Refractive index measurement of dielectric samples using highly focused radially polarized light*. Chinese Optics Letters, 15(3), 030004.

López-Morales, G., Sánchez-López, M. D. M., Lizana, Á., Moreno, I., & Campos, J. (2020). *Mueller matrix polarimetric imaging analysis of optical components for the generation of cylindrical vector beams.* Crystals, 10(12), 1155.

López-Morales, G., Espinosa-Sánchez, Y. M., Flores-Rosas, A., & Vilchis, H. (2025). *Moisture content detection in mango (Mangifera indica L., cv. Ataulfo) and papaya (Carica papaya) slices during drying using an MMI-based sensor*. Sensors, 25(22), 6902.

Marco, D., López-Morales, G., Sánchez-López, M. D. M., Lizana, Á., Moreno, I., & Campos, J. (2021). *Customized depolarization spatial patterns with dynamic retardance functions.* Scientific Reports, 11, 1–13.

Muñoz-Pineda, E., López-Morales, G., & Espinosa-Luna, R. (2019). *Polarization properties of a single polygon of the cuticle of the scarab beetle C. mutabilis studied by micropolarimetry.* Optics Communications, 434, 65–69.

Nabadda, E., López-Morales, G., Marco, D., Sánchez-López, M. D. M., & Moreno, I. (2022). *Mueller matrix polarimetric analysis applied to characterize the physical parameters of a twisted-nematic liquid–crystal modulator.* Optics & Laser Technology, 156, 108567.

Información de los autores.



Guadalupe López Morales es Doctora en Ciencias (Óptica), Maestra en Optomecatrónica e Ingeniera Electrónica, con más de diez años de experiencia en investigación, desarrollo tecnológico y docencia. Es Investigadora Nacional Nivel 1 y cuenta con experiencia en óptica aplicada, instrumentación, sensores, espectroscopía, energías renovables y tecnologías agroalimentarias. Es autora y coautora de 17 artículos científicos arbitrados e indexados y cuenta con desarrollos tecnológicos protegidos mediante propiedad intelectual. Es miembro fundador del grupo de divulgación Tek'bolom.



Héber Vilchis Bravo es un ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por el IPN con maestría y doctorado por el CINVESTAV, especializado en materiales semiconductores, dispositivos optoelectrónicos y energías renovables. Cuenta con más de 16 años de experiencia docente y 19 en investigación, liderando proyectos financiados por SECIHTI (antes CONACYT) y colaboraciones internacionales como el programa Erasmus+. Además, posee una destacada trayectoria institucional en la UNICACH, donde ha sido director y coordinador de posgrados, combinando sus funciones con una activa labor de divulgación científica para niños y jóvenes como miembro fundador del grupo *Tek'Bolom*.



Yuliana M. Espinosa-Sánchez es ingeniera electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, además de maestra en Optomecatrónica y doctora en Ciencias (Óptica) por el Centro de Investigaciones en Óptica. Actualmente es docente en la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas. Durante su posgrado enfocó sus investigaciones en el desarrollo de sensores de películas delgadas basados en la resonancia de plasmones de superficie. Hoy en día colabora en la línea de investigación de fibras ópticas de la FCFM, abarcando áreas como láseres y sensores de interferencia multimodal. Pertenece al SNII nivel I.



Ariel Flores Rosas es Licenciado en la licenciatura en Electrónica la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Maestría en Optoelectrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Cuenta con un Doctorado en ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), fortaleciendo en Fibras ópticas. Desde el año 2014 se ha desempeñado como profesor de tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas donde ha impartido diversas asignaturas en el área de Física y matemáticas y del área de especialidad que es la Óptica. Ha desempeñado el cargo de Coordinador de la Ingeniería Física, Coordinador de Extensión y difusión, Coordinador de investigación y posgrado. Es miembro de Sistema nacional de investigadores e investigadoras SNII, nivel I, Perfil prodep.



María del Mar Sánchez López es Catedrática de Física Aplicada en la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), licenciada y doctora en Física por la Universidad Autónoma de Barcelona. Desarrolla su investigación en el campo de la óptica física, siendo sus líneas de trabajo en luz estructurada, polarización y dispositivos de cristal líquido. Es coautora de un centenar de publicaciones indexadas y es miembro Senior de SPIE (Sociedad Internacional de Óptica y Fotónica). Desde 2020 organiza en la UMH la jornada de divulgación de la ciencia *DivulgaNobel.*



Ignacio Moreno es Catedrático de Óptica en la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se licenció en Ciencias Físicas y recibió su doctorado en Física por la Universidad Autónoma de Barcelona. Cuenta con amplia experiencia en el campo de los moduladores espaciales de luz y sus aplicaciones en óptica difractiva y de polarización. Es Fellow de las sociedades científicas SPIE y Optica (anteriormente OSA). Desde 2017 a 2020 desempeñó el cargo de Presidente de la Sociedad Española de Óptica (SEDOPTICA), y actualmente es Presidente de la Sociedad Europea de Óptica (EOS).

Espectroscopía FTIR en la síntesis y caracterización de poliuretanos renovables.

FTIR spectroscopy for the synthesis and characterization of renewable polyurethanes.

Eder Armando Caballero Moreno (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. eder.caballero01@gmail.com.

Andy Jarenni Gómez Valdéz (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. isemvaldez@outlook.com.

Rocío Meza Gordillo* (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. rocio.mg@tuxtla.tecnm.mx.

María Cristina Velasquillo Martínez (4). Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra. mvelasquillo@ciencias.unam.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 10, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Cuarto Encuentro de Investigación de Estudiantes en Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica 2026.

Resumen.

Los poliuretanos constituyen una de las familias de materiales poliméricos más versátiles debido a la posibilidad de ajustar su composición y arquitectura molecular para obtener espumas, películas, recubrimientos, adhesivos y elastómeros con propiedades diferentes. Sin embargo, una parte importante de sus materias primas continúa procediendo de recursos petroquímicos, lo que ha impulsado el desarrollo de poliuretanos obtenidos parcial o totalmente a partir de aceites vegetales, lignina y otras fuentes de biomasa. En este contexto, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) constituye una herramienta útil para hacer el seguimiento de las transformaciones químicas que ocurren desde la funcionalización de una materia prima renovable hasta la formación, curado, envejecimiento y degradación del poliuretano. En este artículo se presentan los fundamentos esenciales de FTIR y se analiza su aplicación en espumas, películas y recubrimientos, con especial atención a los grupos hidroxilo, isocianato, uretano y carbonilo. Se destaca la importancia de interpretar de manera conjunta distintas regiones del espectro y de complementar la información obtenida mediante FTIR con otras técnicas de caracterización cuando sea necesario.

Palabras clave: Espectroscopía FTIR, polioles, recursos renovables.

Abstract.

Polyurethanes are among the most versatile polymeric materials because their composition and molecular architecture can be adjusted to produce foams, films, coatings, adhesives, and elastomers with different properties. However, a significant proportion of the raw materials used in their production still comes from petrochemical resources, which has encouraged the development of polyurethanes partially or fully derived from vegetable oils,

lignin, and other biomass sources. In this context, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) is a useful tool for monitoring the chemical transformations that occur from the functionalization of renewable feedstocks through polyurethane formation, curing, aging, and degradation. This article presents the essential fundamentals of FTIR and discusses its application to polyurethane foams, films, and coatings, with particular attention to hydroxyl, isocyanate, urethane, and carbonyl groups. Emphasis is placed on the joint interpretation of different spectral regions and on complementing FTIR information with other characterization techniques when necessary.

Keywords: FTIR spectroscopy, polyols, renewable resources.

1. Introducción.

El desarrollo de poliuretanos de origen renovable plantea diversos retos relacionados con la identificación de las transformaciones químicas que ocurren desde la modificación de la materia prima hasta la obtención y posterior degradación del material. En este contexto, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) constituye una herramienta de particular interés, ya que permite relacionar la evolución de determinados grupos funcionales con las distintas etapas de síntesis y caracterización del polímero.

Los poliuretanos (PU) forman una de las familias de materiales poliméricos más versátiles. La variación en la naturaleza, funcionalidad y proporción de sus precursores permite obtener productos con propiedades muy diferentes, entre ellos espumas rígidas para aislamiento térmico, espumas flexibles, elastómeros, adhesivos, selladores, recubrimientos y películas. La necesidad de reducir la dependencia de recursos fósiles ha favorecido el desarrollo de formulaciones que incorporan materias primas renovables. Mo et al. (2024) describen el empleo de aceites vegetales, lignina, polisacáridos y otras fuentes de biomasa como precursores o componentes funcionales de poliuretanos. Entre estas materias primas, resaltan los aceites vegetales, debido a que su estructura puede modificarse químicamente para introducir grupos funcionales capaces de participar en la reacción de formación del PU (figura 1). Musik et al. (2021) señalan que procesos como la epoxidación y la posterior apertura de anillos oxirano constituyen rutas relevantes para introducir grupos hidroxilo y producir polioles de origen vegetal. En el caso de las espumas, Santos et al. (2025) muestran que los biopolioles pueden incorporarse tanto en sistemas rígidos como flexibles. De manera experimental, Kim et al. (2024) demostraron la utilización de lignina y aceite de ricino en espumas rígidas de poliuretano, observando que la naturaleza del biopoliol influye en la reactividad, morfología y propiedades del material.

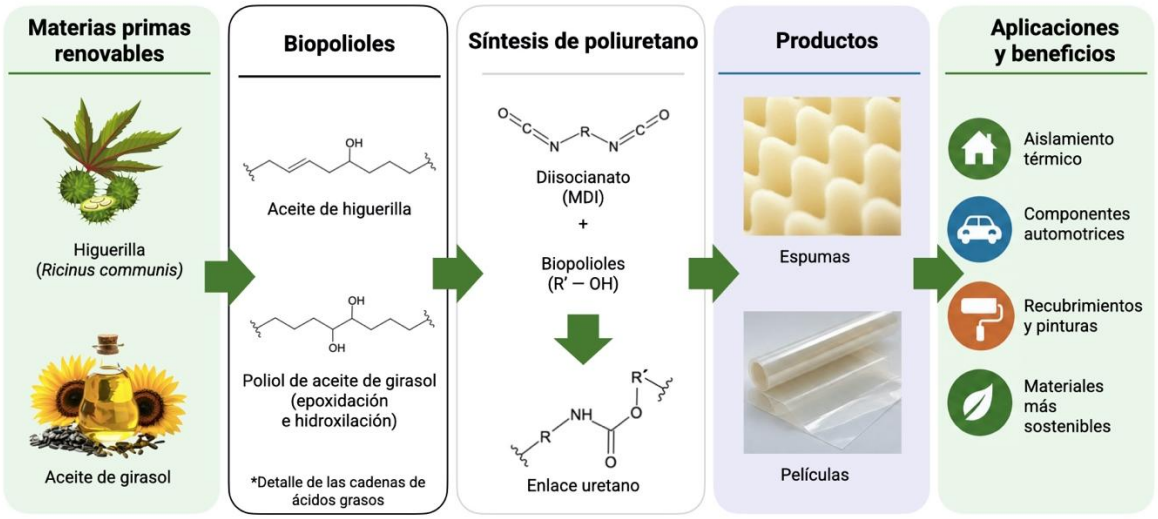


Figura 1. Espectroscopía FTIR como herramienta de seguimiento del ciclo químico de un poliuretano renovable.

En este contexto, la espectroscopía FTIR ofrece una ventaja analítica importante, ya que permite examinar de manera sucesiva las transformaciones químicas asociadas con la modificación de la materia prima, la formación del poliol, la reacción con el isocianato, el curado y los posteriores procesos de envejecimiento o degradación.

2. Métodos.

El contenido técnico presentado en la conferencia y desarrollado en este artículo se sustentó en una revisión de literatura científica, complementada con ejemplos experimentales de espectros FTIR correspondientes a materias primas, polioles, poliuretanos y materiales sometidos a procesos de degradación. Se priorizaron publicaciones comprendidas principalmente entre 2022 y 2025 que abordaran alguno de los siguientes aspectos: síntesis de polioles a partir de materias primas renovables, preparación de espumas o películas de PU, utilización de espectroscopía FTIR para el seguimiento de grupos funcionales, evaluación del curado y análisis de procesos de envejecimiento o degradación.

Para la interpretación espectral se consideraron de manera principal las regiones asociadas con vibraciones O-H, N-H, N=C=O, C=O, C-N, C-O y C-O-C. Los intervalos de número de onda se presentan como valores aproximados, ya que la posición exacta de las bandas puede modificarse por factores como la estructura química, los enlaces de hidrógeno, la formulación, el estado físico, la microseparación de fases y las condiciones instrumentales.

En particular, los espectros FTIR presentados fueron tomados mediante un espectrómetro FT-IR Thermo Scientific (Nicolet iS10), en un rango de número de onda de 4000 a 550 cm-1, con 40 escaneos. Las muestras corresponden a películas de poliuretano sintetizadas a partir del poliol correspondiente y 4,4'-difenil metilen diisocianato (MDI), en una relación molar 1:1, polimerizado por vaciado en molde y curado en desecador a temperatura ambiente durante 7 días. Como poliol se utilizó aceite de higuerilla (*Ricinus communis*) y aceite vegetal usado epoxidado e hidroxilado *in situ* con ácido peracético y catálisis ácida, con número de hidroxilo de 166 y 92 mg KOH/g, respectivamente.

3. Desarrollo.

3.1. Fundamentos de la espectroscopía FTIR.

La espectroscopía infrarroja es una técnica analítica que emplea la radiación de ondas electromagnéticas correspondiente al infrarrojo medio (2.5-25 μm) (Xie et al., 2022). A través de la interacción radiación IR- materia, es posible realizar determinaciones estructurales y/o moleculares de especies orgánicas.

Las moléculas no presentan estructuras rígidas, los átomos que las integran, experimentan movimientos vibracionales que, de manera simplificada, pueden clasificarse en estiramientos (ν), relacionados principalmente con cambios en la longitud de los enlaces, y flexión (δ), o deformaciones asociadas con variaciones en los ángulos entre ellos. Para que una vibración sea activa en espectroscopía infrarroja se debe producir un cambio en el momento dipolar de la molécula. Cuando la frecuencia de la radiación incidente coincide con la frecuencia característica de dicha vibración, se produce absorción de energía. Como resultado, distintos enlaces y grupos funcionales generan señales en determinadas regiones del espectro, lo cual es posible registrarse en bandas o señales en un espectro infrarrojo (figura 2) (Peña et al., 2023).

Un espectro FTIR representa normalmente el número de onda, expresado en cm^{-1}, frente a absorbancia o transmitancia. Sin embargo, su interpretación no debe limitarse a la identificación de máximos. La posición, intensidad, anchura y desplazamiento de las bandas también dependen del entorno químico, de las interacciones intermoleculares y del estado físico del material. En este sentido, una banda aislada rara vez permite identificar de forma segura una estructura. Rodriguez et al. (2025), al estudiar películas de PU derivadas de aceite de ricino, analizaron conjuntamente regiones correspondientes a N-H, C=O, C-N y C-O, además de verificar la ausencia de NCO residual, resultando en un enfoque más robusto que el análisis basado en una única señal.

Entre las configuraciones instrumentales más utilizadas para polímeros se encuentra ATR-FTIR. En esta modalidad, la muestra se coloca directamente sobre un cristal de alto índice de refracción y una onda evanescente interactúa con una región próxima a la superficie. Esta característica permite analizar películas, recubrimientos y fragmentos de espuma con una preparación mínima. Zuliani et al. (2022) emplearon ATR-FTIR para evaluar poliuretanos renovables antes y después de ensayos de degradación en suelo. El trabajo mostró que la técnica puede utilizarse no sólo para identificar cambios químicos globales, sino también para evaluar su distribución espacial mediante mapeo espectroscópico.

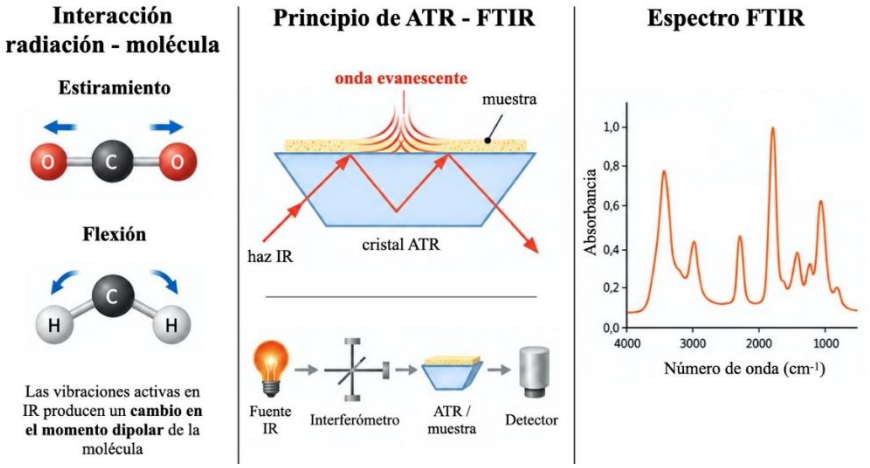


Figura 2. Del movimiento vibracional al espectro ATR-FTIR.

3.2. Transformación de aceites vegetales en polioles y poliuretanos.

Los aceites vegetales están constituidos principalmente por triglicéridos cuyos ácidos grasos pueden presentar distintos grados de insaturación. Estos dobles enlaces constituyen sitios de interés para introducir nuevos grupos funcionales mediante diferentes rutas de modificación química. Musik et al. (2021) describen procedimientos como la epoxidación seguida de apertura de anillos oxirano, los cuales permiten introducir grupos hidroxilo y producir polioles susceptibles de reaccionar posteriormente con isocianatos.

La espectroscopía FTIR puede utilizarse para dar seguimiento a estas transformaciones mediante la comparación de los espectros obtenidos antes y después de la funcionalización. La disminución de señales relacionadas con insaturaciones y el incremento de la región O-H son consistentes con la formación de grupos hidroxilo. Sin embargo, cuando se pretende determinar con mayor precisión el grado de transformación, esta información debe complementarse con parámetros como el índice de hidroxilo, el índice de yodo u otras técnicas instrumentales.

Una vez obtenido el poliol, los grupos hidroxilo reaccionan con grupos isocianato para formar enlaces uretano (figura 3). En sistemas reales, esta reacción se encuentra condicionada por la funcionalidad de los polioles e isocianatos y por la presencia de extensores de cadena, catalizadores, agua y otros aditivos. La presencia de agua presenta gran importancia en poliuretanos, ya que su reacción con el isocianato genera CO_2 y especies amínicas que pueden reaccionar posteriormente para formar grupos urea. Santos et al. (2025) describen esta combinación de reacciones como un elemento central en la formación de numerosos sistemas espumados. En consecuencia, el espectro de una espuma de PU puede contener contribuciones correspondientes a grupos uretano, urea, poliol residual y otros componentes de la formulación.

3.3. Seguimiento de la síntesis y del curado.

La región correspondiente al grupo isocianato constituye una de las más útiles para el seguimiento de la reacción. El estiramiento N=C=O suele observarse aproximadamente entre 2230 y 2280 cm^{-1}, aunque su posición puede modificarse en función de la estructura del isocianato y de su entorno químico (Tabla 1). Zuliani et al. (2022) siguieron una absorción próxima a 2230 cm^{-1} durante la formación de PU de origen biológico, mientras que Rodriguez et al. (2025) consideraron una señal cercana a 2250 cm^{-1} en películas derivadas de aceite de higuerilla. Estas diferencias evidencian la conveniencia de expresar las asignaciones como intervalos y no como valores universales.

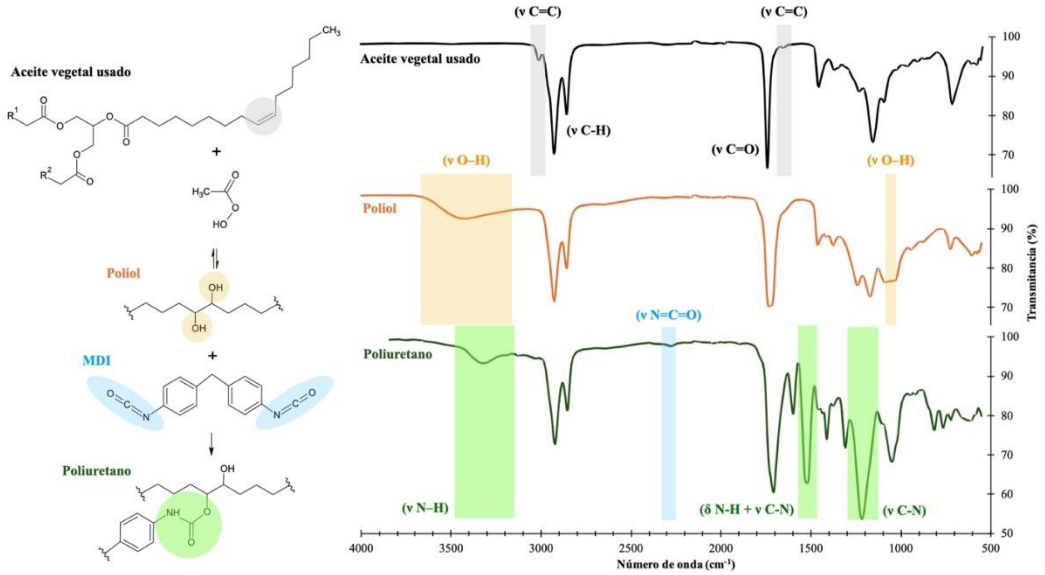


Figura 3. Evolución espectral durante la síntesis de un poliuretano renovable.

Durante el curado, la intensidad de la señal NCO disminuye conforme el isocianato es consumido. De Smet et al. (2022) evaluaron recubrimientos de PU renovables mediante el análisis conjunto de la desaparición de NCO y la evolución de señales correspondientes a N-H y C=O. La región de estiramiento N-H suele localizarse aproximadamente entre 3200 y 3500 cm^{-1} y puede verse afectada por enlaces de hidrógeno y por el solapamiento con grupos O-H residuales. Rodriguez et al. (2025) observaron una banda cercana a 3335 cm^{-1}, mientras que Kim et al. (2024) reportaron absorciones próximas a 3300 cm^{-1} en espumas rígidas.

La región carbonilo (C=O), requiere una interpretación especial, dado que en un PU pueden coexistir carbonilos asociados con uretanos, ureas y ésteres, además de carbonilos libres o involucrados en enlaces de hidrógeno. Por ello, las señales comprendidas aproximadamente entre 1680 y 1750 cm^{-1} pueden presentar varias contribuciones.

Cuando las condiciones de adquisición son reproducibles, la banda correspondiente al NCO puede utilizarse también con fines semicuantitativos mediante su normalización respecto de una banda interna relativamente estable. Este procedimiento permite comparar el consumo relativo de isocianato a diferentes tiempos de reacción o curado.

Tabla 1. Principales regiones FTIR de interés en poliuretanos.

Número de onda aproximado (cm^{-1})	Grupo / modo vibracional	Asignación de banda en PU
3600 - 3200	ν(O-H), ν(N-H)	OH del poliol o residual N–H de grupos uretano/urea Posibles interacciones por enlace de hidrógeno

2970 - 2850	ν(C-H)	Segmentos alifáticos, principalmente CH_2 y CH_3
2280 - 2230	ν(N=C=O)	Isocianato libre o residual Seguimiento de conversión
1750 - 1680	ν(C=O)	Carbonilos de éster, uretano y urea Carbonilos libres o asociados por enlace de hidrógeno
1550 - 1510	δ(N-H) + ν(C-N)	Regiones asociadas con grupos uretano y urea
1300 - 1200	ν(C-N), ν(C-O)	Enlaces relacionados con la estructura uretano
1200 - 1000	ν(C-O-C), ν(C-O)	Segmentos poliéster/poliéster, polioles y enlaces asociados con la matriz de PU

3.4. Aplicación de FTIR al estudio de degradación.

La utilidad de la espectroscopía FTIR va más allá de la síntesis del PU. Durante su vida útil, los PU pueden quedar expuestos a radiación ultravioleta, oxígeno, humedad, temperatura o microorganismos, factores capaces de producir modificaciones progresivas de su estructura química (figura 4). Zuliani et al. (2022) analizaron PU de origen biológico antes y después de ensayos de degradación en suelo y observaron cambios en regiones asociadas con carbonilos, cadenas alifáticas y enlaces C-O-C. Estos resultados muestran que la espectroscopía FTIR puede emplearse para dar seguimiento a la evolución química del material durante la exposición a dichos agentes. La radiación ultravioleta constituye un factor relevante. Lopes et al. (2025) estudiaron PU obtenidos a partir de aceites de linaza y maracuyá sometidos a envejecimiento acelerado. Mediante espectroscopía FTIR se identificaron modificaciones en diferentes regiones espectrales, mientras que el análisis termogravimétrico permitió evaluar cambios en la estabilidad térmica.

La interpretación de estos fenómenos debe realizarse con precaución. Un incremento de la región carbonilo puede ser consistente con procesos oxidativos, pero no constituye por sí solo evidencia de un mecanismo particular. Procesos como oxidación, hidrólisis, ruptura de cadenas y pérdida de fragmentos pueden ocurrir de manera simultánea.

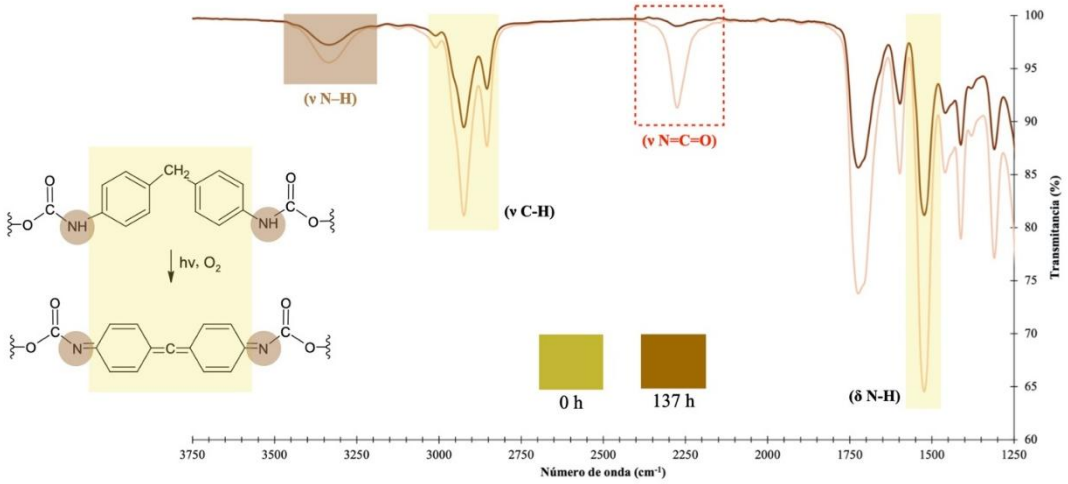


Figura 4. Evolución del espectro FTIR de un recubrimiento de poliuretano durante su exposición a radiación UV.

3.5. Aplicación en espumas, películas y recubrimientos.

En espumas de PU, la reacción química tiene lugar de manera simultánea con procesos de nucleación, expansión y crecimiento celular. Santos et al. (2025) señalan que la naturaleza de los biopolioles influye tanto en la química de la red como en la morfología y en las propiedades finales del material. Kim et al. (2024) muestran esta relación al combinar FTIR con microscopía, análisis térmico y ensayos mecánicos. En dicho trabajo, la espectroscopía FTIR permitió evaluar aspectos de la estructura química, mientras que las técnicas complementarias permitieron relacionar esa estructura con el desempeño físico de la espuma.

En películas y recubrimientos, el interés suele concentrarse en el grado de curado, la presencia de NCO residual y las modificaciones superficiales asociadas con el envejecimiento. Rodriguez et al. (2025) emplearon ATR-FTIR para caracterizar películas derivadas de aceite de ricino, siendo especialmente adecuada en estos sistemas debido a su sensibilidad hacia las regiones próximas a la superficie. Esta característica la convierte en una herramienta útil para estudiar envejecimiento UV, oxidación, hidrólisis y modificaciones superficiales.

En términos generales, la espectroscopía FTIR permite identificar grupos funcionales presentes y cómo evolucionan. La interpretación de estos cambios sobre la morfología, estabilidad térmica, comportamiento mecánico o funcionalidad del material requiere la integración de técnicas complementarias, como la difracción de rayor X, espectroscopía Raman (ER) y resonancia magnética nuclear (RMN) (Pastor et al., 2024).

3.6. Limitaciones y técnicas complementarias.

A pesar de su rapidez, versatilidad y alta sensibilidad frente a cambios en grupos funcionales, la espectroscopía FTIR no proporciona por sí sola una descripción completa de la estructura y desempeño de un poliuretano. El espectro permite reconocer la presencia y evolución de determinados enlaces químicos, pero no determina directamente parámetros como la masa molecular, la longitud de las cadenas de carbono, la densidad de entrecruzamiento o las propiedades mecánicas del material. Por esta razón, sus resultados deben interpretarse dentro de un esquema de caracterización más amplio.

Una de las principales limitaciones de FTIR es el solapamiento de bandas. Esta situación resulta particularmente evidente en la región carbonilo (1750 cm^{-1}), donde pueden coexistir contribuciones correspondientes a grupos uretano, urea, éster y carbonilos en diferentes estados de asociación mediante enlaces de hidrógeno-hidrógeno (1750 – 1680 cm^{-1}). De manera similar, la región comprendida aproximadamente entre 3200 y 3600 cm^{-1} puede incluir contribuciones simultáneas de grupos O-H y N-H, cuya posición y forma dependen además de las interacciones intermoleculares. En estos casos, una modificación en la intensidad o posición de una banda no siempre puede atribuirse de forma segura a una única transformación química (Ochoa-Flores et al., 2025).

La reproducibilidad experimental constituye otra consideración importante. En mediciones ATR-FTIR, el contacto entre la muestra y el cristal, la presión aplicada, la heterogeneidad superficial y la presencia de humedad pueden modificar la intensidad aparente de las señales. Asimismo, procedimientos como la corrección de línea base, la normalización y la selección de las regiones de integración pueden influir en la comparación entre espectros. Por estas razones, la información espectroscópica adquiere mayor valor cuando se integra con técnicas capaces de examinar otros niveles de la estructura y del comportamiento del material, como lo son: resonancia magnética nuclear (RMN), cromatografía de permeación en gel (GPC o SEC), calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), análisis mecánico dinámico (DMA), así como ensayos directamente relacionados con la aplicación prevista, p.e. pruebas de tracción, compresión, dureza o adhesión, entre otros (Bikiaris et al., 2025).

Conclusiones.

La espectroscopía FTIR constituye una herramienta de gran utilidad para el estudio de poliuretanos renovables, ya que permite realizar el seguimiento de las distintas etapas de transformación química, desde la materia prima hasta el material envejecido. Durante la funcionalización de aceites vegetales, la espectroscopía FTIR puede aportar evidencia consistente con la formación de polioles. En la etapa de síntesis permite seguir el consumo del grupo isocianato y la evolución de señales asociadas con enlaces N-H, C=O, C-N y C-O. Posteriormente, puede utilizarse para evaluar modificaciones químicas vinculadas con procesos de envejecimiento y degradación.

La literatura revisada muestra que estas aplicaciones son válidas tanto para espumas como para películas y recubrimientos. Sin embargo, la interpretación espectral debe realizarse considerando que las posiciones de las bandas no son universales y que una señal aislada no es suficiente para identificar inequívocamente una estructura o mecanismo. En este sentido, la principal fortaleza de FTIR reside en el análisis de patrones de transformación. La

comparación sistemática entre materias primas, productos intermedios, polímeros curados y materiales sometidos a envejecimiento permite utilizar el espectro como un registro de la evolución química del poliuretano.

Créditos.

Este artículo se desarrolló a partir de la conferencia titulada *"Espectroscopía FTIR en la síntesis y caracterización de poliuretanos renovables"*, presentada en Cuarto Encuentro de Estudiantes de Investigación de Óptica, Optoelectrónica, Optomecatrónica y Fotónica, el día 17 de marzo de 2026 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por las becas doctorales otorgadas.

Referencias bibliográficas.

Bikiaris, N. D., Malini, E., Christodoulou, E., Klonos, P. A., Kyritsis, A., Galaris, A., Pantopoulos, K. (2025). Amphiphilic Thermoresponsive Triblock PLA-PEG-PLA and Diblock mPEG-PLA Copolymers for Controlled Deferoxamine Delivery. Gels, 11(9), 742. https://doi.org/10.3390/gels11090742.

De Smet, D., Uyttendaele, W., & Vanneste, M. (2022). Bio-Based 2K PU Coating for Durable Textile Applications. *Coatings*, *12*(2), 169. https://doi.org/10.3390/coatings12020169.

Kim, H. J., Jin, X., & Choi, J. W. (2024). Investigation of bio-based rigid polyurethane foams synthesized with lignin and castor oil. *Scientific Reports*, *14*(1), 13490. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64318-8

Lopes, R. V. V., Quirino, R. L., Breves, R. A., Pezzin, A. P. T., Mazur, L. P., dos Santos, M. L., & Sales, M. J. A. (2025). Accelerated Weathering Tests of Linseed and Passion Fruit Oil-Based Polyurethanes. *Coatings*, *15*(5), 550. https://doi.org/10.3390/coatings15050550.

Mo, Y., Huang, X., & Hu, C. (2024). Recent Advances in the Preparation and Application of Bio-Based Polyurethanes. *Polymers*, *16*(15), 2155. https://doi.org/10.3390/polym16152155.

Musik, M., Bartkowiak, M., & Milchert, E. (2021). Advanced Methods for Hydroxylation of Vegetable Oils, Unsaturated Fatty Acids and Their Alkyl Esters. *Coatings*, *12*(1), 13. https://doi.org/10.3390/coatings12010013.

Ochoa Florez, Diego Enrique, Chaparro Garcia, Amanda Lucía, Salazar Tellez, Criss Fernando. (2025). Estabilidad térmica de grupos funcionales en aceites vegetales analizados mediante espectroscopia infrarroja. Ciencia en Desarrollo, 16(1), 166-173. https://doi.org/10.19053/uptc.01217488.v16.n1.2025.18402.

Pastor, E., Lian, Z., Xia, L. (2024). Complementary probes for the electrochemical interface. Nat Rev Chem 8, 159–178. https://doi.org/10.1038/s41570-024-00575-5.

Peña, P. P. (2023). Espectroscopía de infrarrojo: Análisis e interpretación de compuestos. Universidad Juárez del Estado de Durango. 1-128. Libro

Rodriguez, O. T., Diaz, L. E., & Valero, M. F. (2025). Modified Castor Oil-Based Polyurethane Films with Streptomyces Extracts Presenting Anti-Methicillin-Resistant Staphylococcus aureus Activity. *Polymers*, *17*(17), 2383. https://doi.org/10.3390/polym17172383.

Santos, M., Mariz, M., Tiago, I., Alarico, S., & Ferreira, P. (2025). Bio-Based Polyurethane Foams: Feedstocks, Synthesis, and Applications. *Biomolecules*, *15*(5), 680. https://doi.org/10.3390/biom15050680.

Xie, H., Li, C., Wang, Q. (2022). A critical review on performance and phase separation of thermosetting epoxy asphalt binders and bond coats. Construction and Building Materials, 326, 126792. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126792.

Zuliani, A., Rapisarda, M., Chelazzi, D., Baglioni, P., & Rizzarelli, P. (2022). Synthesis, Characterization, and Soil Burial Degradation of Biobased Polyurethanes. *Polymers*, *14*(22), 4948. https://doi.org/10.3390/polym14224948.

Información de los autores.



Eder Armando Caballero Moreno es Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de Colombia, cuenta con Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica por el Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez y actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en el mismo instituto.



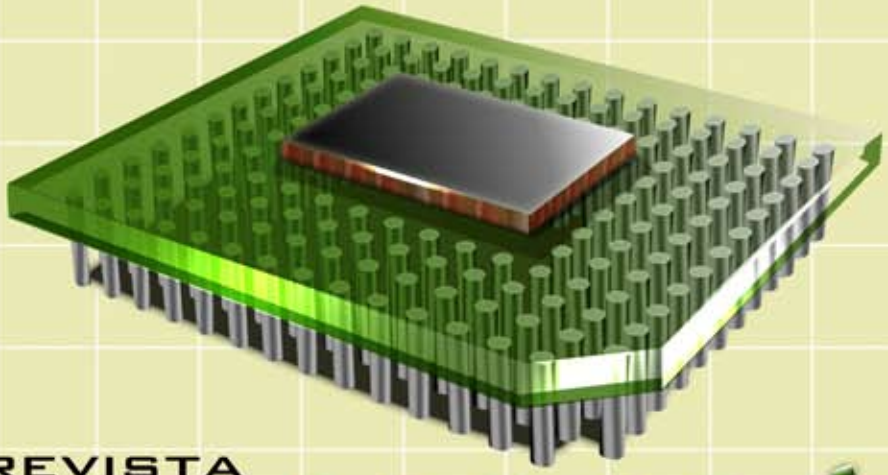
Andy Jarenni Gómez Valdéz tiene formación en Ingeniería Bioquímica, egresada del Tecnológico Nacional de México, Maestra en Ciencias en Ingeniería Bioquímica egresada de la misma institución y actualmente alumna del Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en la línea de investigación en alimentos.



Rocío Meza Gordillo es profesora de tiempo completo del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Desarrolla proyectos de investigación relacionados con la valorización de residuos agroindustriales, extracción y síntesis orgánica de compuestos de interés relacionados con la generación de materiales.



María Cristina Velasquillo Martínez es investigadora del Instituto Nacional de Rehabilitación “Luis Guillermo Ibarra Ibarra”, especializada en ingeniería de tejidos, terapia celular, medicina regenerativa y biomateriales. Su trabajo se ha enfocado en el desarrollo de sustitutos biológicos de piel, cartílago y hueso, así como en el estudio de la interacción entre células y biomateriales. Es tutora acreditada de maestría y doctorado en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM y participa en la formación de recursos humanos en medicina regenerativa e ingeniería tisular.



REVISTA

TECNOLOGÍA DIGITAL

www.revistatecnologiadigital.com