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.

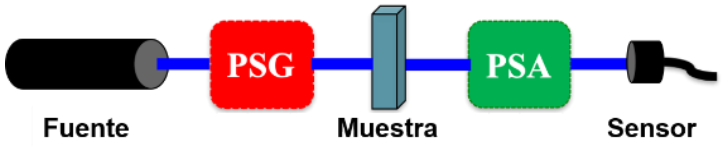


Figura 1. Diagrama de un polarímetro.
PSG y PSA: generador y analizador de estados de polarización, respectivamente.

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.

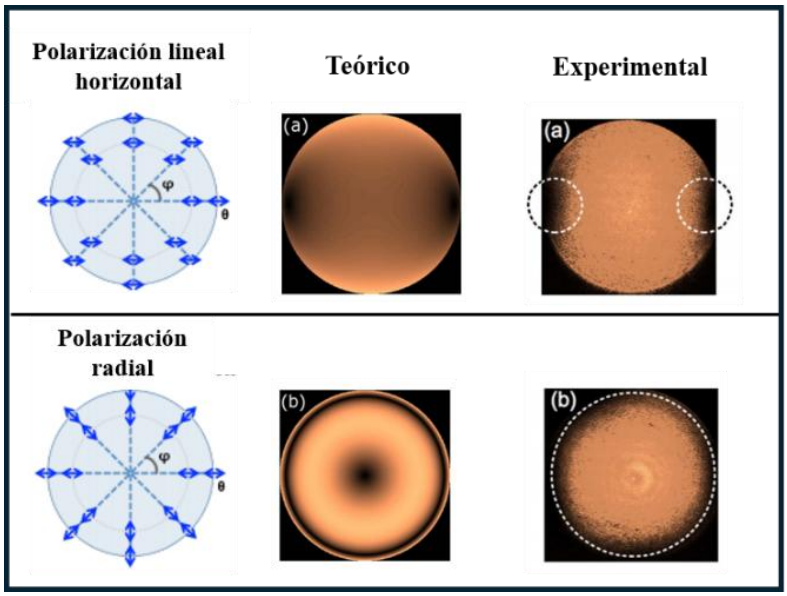


Figura 2. Determinación del ángulo de Brewster para calcular el índice de refracción en un material dieléctrico (López Morales, et al., 2017).

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.

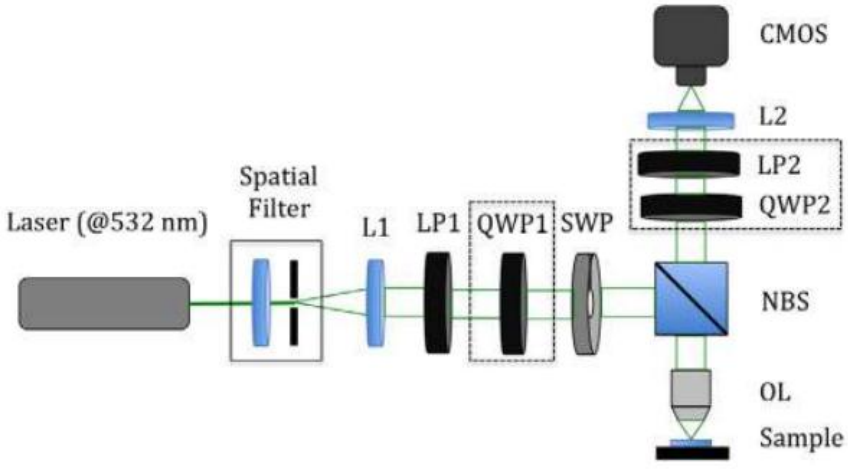


Figura 3. Esquema de un polarímetro de imágenes en modo reflexión (Muñoz Pineda, López Morales & Espinosa Luna, 2019).

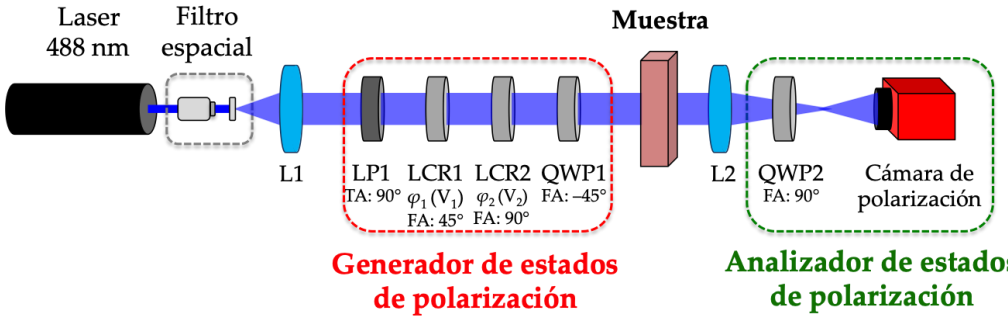


Figura 4. Esquema de un polarímetro de imágenes en modo transmisión (López-Morales et al., 2020).

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.

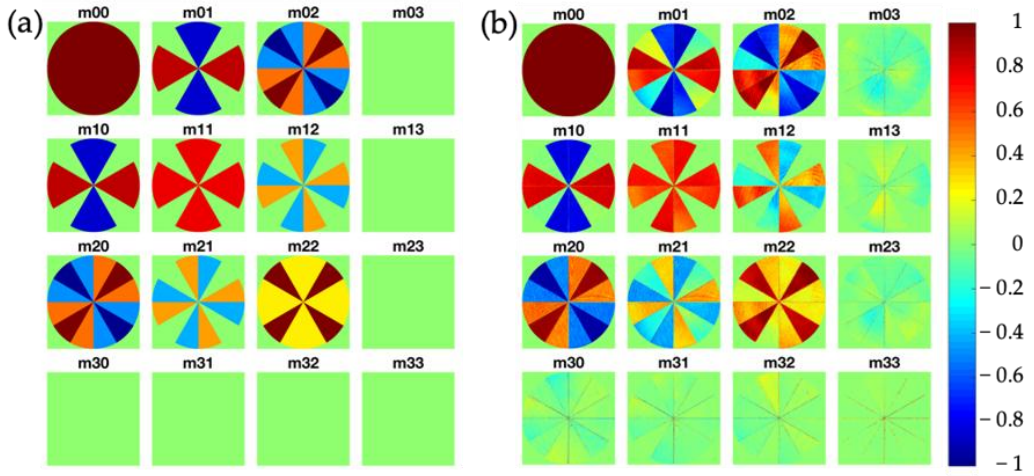


Figura 5. Matriz de Mueller por imagen de un polarizador radial (López-Morales et al., 2020).

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.

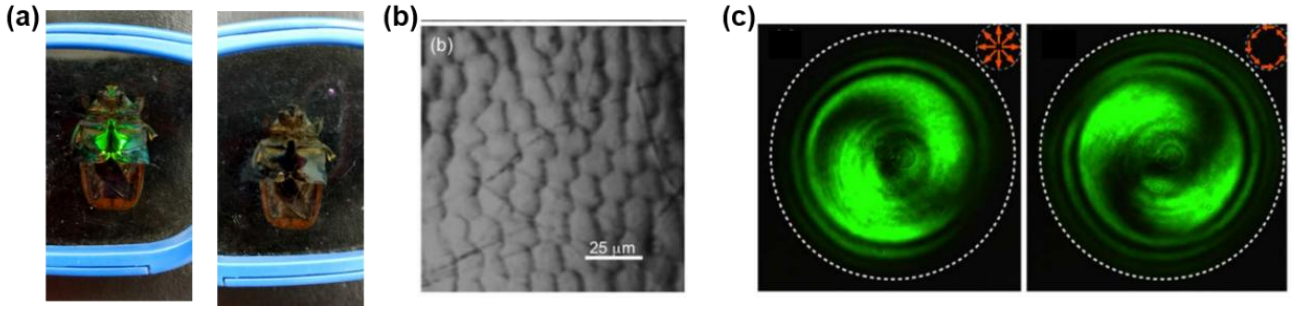


Figura 6. Análisis de la cutícula del escarabajo *C. mutabilis* por polarización (Muñoz Pineda, López Morales & Espinosa Luna, 2019).

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).

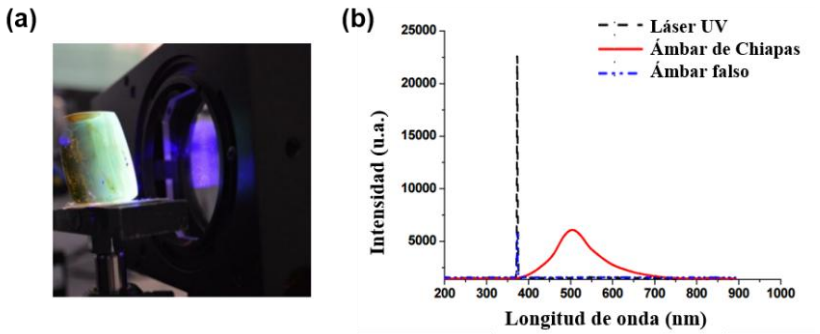


Figura 7. Respuesta óptica a luz ultravioleta (a) y espectro de emisión (b) del ámbar de Chiapas**.**

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.

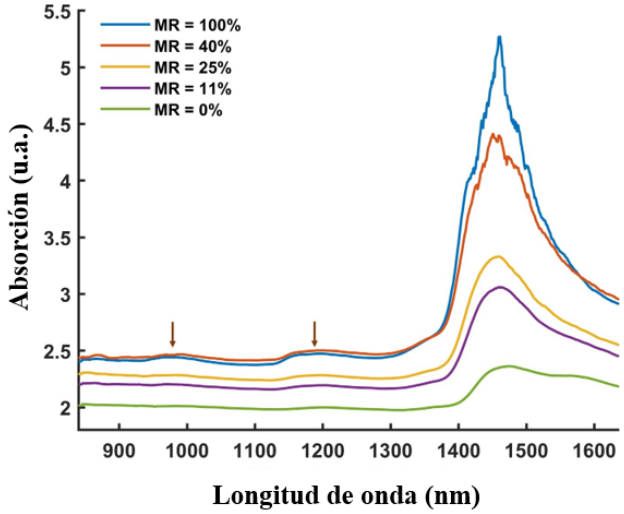


Figura 8. Espectro de absorción NIR de rebanada de mamey con diferente contenido de humedad (MR) (López-Morales et al., 2023).

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).

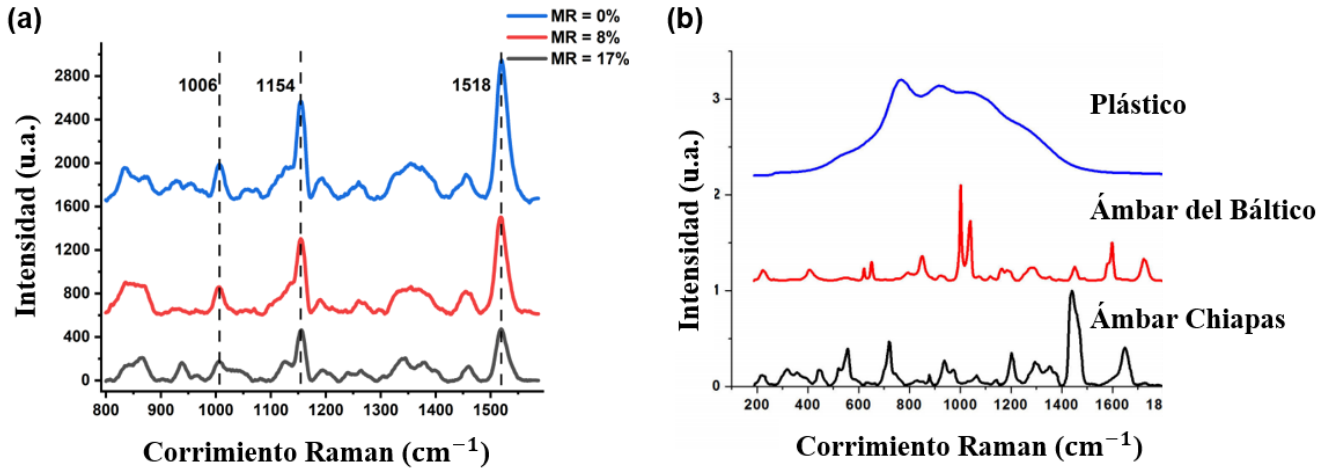


Figura 9. Espectro Raman de rebanada de mamey durante proceso de secado (a) y ámbar de Chiapas (López-Morales et al., 2023; López-Morales et al., 2014).

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.

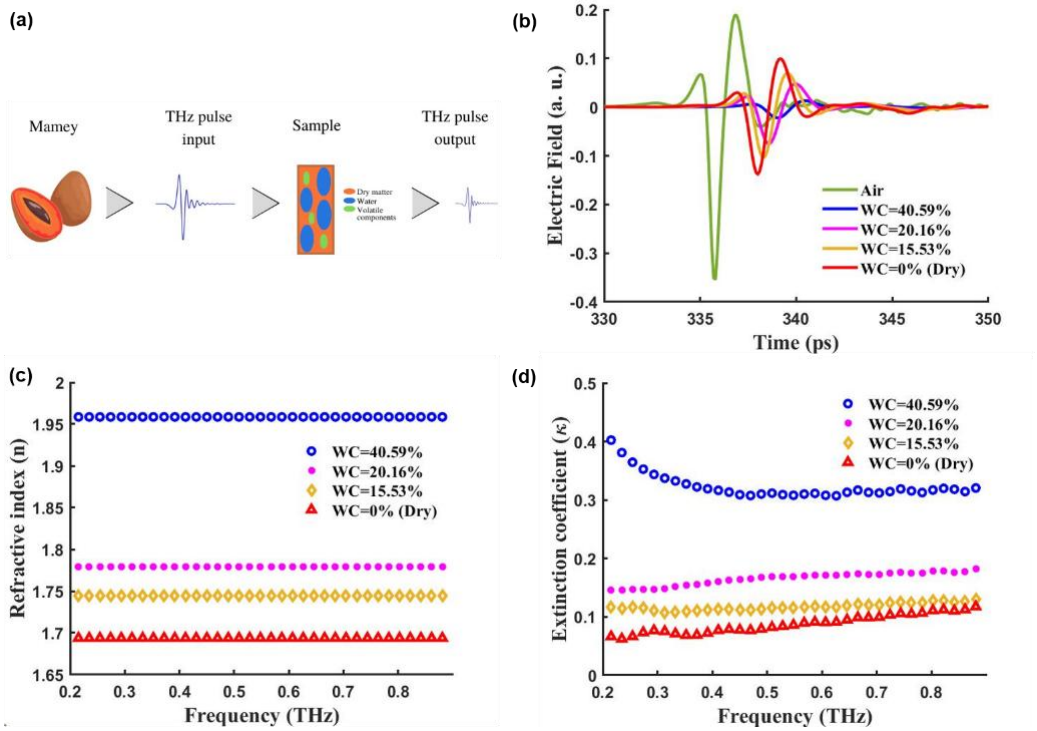


Figura 10. Espectro de rebanadas de mamey con diferente contenido de agua (WC) en el rango de terahertz.

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.

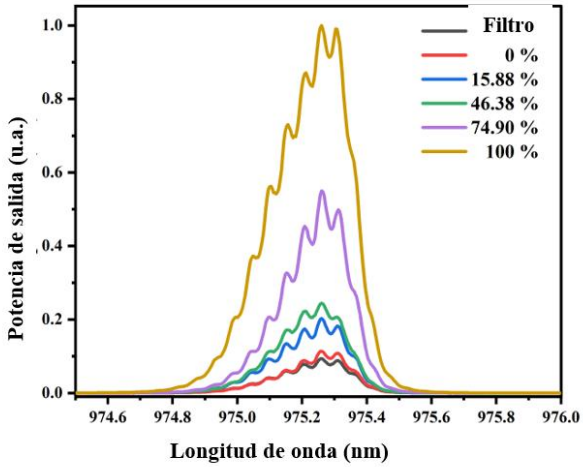


Figura 11. la respuesta espectral de muestras de papaya con diferentes valores de contenido de humedad. Las muestras secas y frescas corresponden al 0% y 100%, respectivamente

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).