

Caracterización física del biocompuesto PCL/fibras de hoja de maíz Physical characterization of PCL/fibers of corn leaf biocomposite

M. A. del Razo Ramírez^a , R. N. Hernández Hernández^b , Z. Gómez Soto^b , R. A. Vázquez García^b , Sofia Vazquez-Rodriguez^c , M.A. Veloz Rodríguez^{b*} 

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ICAP, Avenida Universidad #133 colonia San Miguel Huatengo, CP 43775, Tulancingo, Hgo.

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ICBI-AACTYM, Carr. Pachuca – Tulancingo km 4.5, CP 42184, Mineral de la Reforma, Hgo.

^c Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME, Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria, C.P. 66455, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología (CIIDIT) - Universidad Autónoma de Nuevo León, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT), C.P. 66600, Apodaca, Nuevo León.

Resumen

El uso de materiales poliméricos en una amplia variedad de aplicaciones continúa siendo un área de interés para la comunidad científica, debido a los requerimientos en la obtención de nuevos materiales poliméricos con propiedades físicas, químicas y mecánicas, que sean de fácil degradabilidad o que al degradarse eviten la presencia de microplásticos que actualmente representan un problema de salud y contaminación al ambiente. En este trabajo se revisa el comportamiento sobre la permeabilidad de un material biocompuesto de policaprolactona (PCL) con la adición de fibras obtenidas de residuos de la hoja del maíz. Aquí, se presentan los resultados conseguidos al monitorear la permeabilidad de las películas formadas del biocompuesto de PCL y fibras de hoja de maíz (PCL/HM), con el uso de una celda de difusión horizontal, a través de un proceso de cambios de pH y conductividad eléctrica entre una solución buffer de pH 7 (neutro) y una solución de ácido acético al 3%. También, se presentan los cambios que sufren las propiedades mecánicas de las películas (deformación, fuerza tensil y módulo de Young) y se correlacionan con la permeabilidad que presentan. Los resultados sugieren que la incorporación de fibras de la hoja de maíz en matrices de PCL permite modificar las propiedades mecánicas y superficiales de las películas. Estos biocompuestos muestran un desempeño mecánico adecuado, lo que sugiere su uso potencial para aplicaciones en áreas como empaques y agricultura, aunque deberán hacerse estudios adicionales, particularmente en términos de biodegradabilidad.

Keywords: Biocompuestos, PCL, fibras de hoja de maíz, permeabilidad, conductividad.

Abstract

The use of polymeric materials in a wide variety of applications continues to be an area of interest for the scientific community, due to the requirements for obtaining new polymeric materials with physical, chemical, and mechanical properties that are easily degradable or that, upon degradation, prevent the presence of microplastics, which currently represent a health and environmental pollution problem. This work reviews the behavior regarding the permeability of a biocomposite material made of polycaprolactone (PCL) with the addition of fibers obtained from corn leaf residues. Here, we present the results obtained by monitoring the permeability of the films formed from the PCL and corn leaf fiber biocomposite (PCL/CL), using a horizontal diffusion cell, through a process of pH and electrical conductivity changes between a pH 7 buffer solution (neutral) and a 3% acetic acid solution. Additionally, the changes in the mechanical properties of the films (deformation, tensile strength, and Young's modulus) are presented and correlated with their permeability. The results suggest that the incorporation of corn leaf fibers into PCL matrices allows for the modification of the mechanical and surface properties of the films. These biocomposites exhibit adequate mechanical performance, which indicates their potential use for applications in areas such as packaging and agriculture, although further studies should be conducted, particularly in terms of biodegradability.

Keywords: Biocompounds, PCL, corn leaf fibers, permeability, conductivity.

*Autor para la correspondencia: mveloz@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: marcodelrazo21@gmail.com (Marco Antonio del Razo Ramírez), he435888@uaeh.edu.mx (Régula Nallely Hernández Hernández), go242872@uaeh.edu.mx (Ziana Gómez Soto), rosav@uaeh.edu.mx (Rosa Angeles Vázquez García), sofia.vazquezrd@uanl.edu.mx (Sofia Vazquez Rodriguez), mveloz@uaeh.edu.mx (María Aurora Veloz Rodríguez).



Historial del manuscrito: recibido el 26/11/2025, última versión-revisada recibida el 03/02/2026, aceptado el 05/02/2026, publicado el 06/04/2026. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial2.16711>

1. Introducción

El bajo costo, durabilidad y ligereza de las películas plásticas han permitido su amplia aplicación en diversas industrias; sin embargo, estas mismas propiedades representan un riesgo ambiental considerable. Una vez desechadas, la exposición a condiciones ambientales, químicas y térmicas deteriora sus propiedades, provocando la fragmentación en pequeños trozos, conocidos como microplásticos (Dimassi et al., 2022; Pfohl et al., 2022). Estos microplásticos, dada su baja biodegradabilidad, generan impactos negativos tanto en el ambiente como en la salud de los seres vivos (Dimassi et al., 2022). Frente a esta problemática, surge el interés por desarrollar materiales biodegradables que reduzcan el consumo de recursos fósiles, disminuyan los costos de producción y a la vez, presenten mejores propiedades en comparación con los polímeros tradicionales (Dallaev et al., 2025; Laycock et al., 2023).

En este contexto, la degradación controlada y la permeabilidad de las películas plásticas se erigen como factores clave en aplicaciones tan diversas como el empaquetado alimentario, la agricultura y la construcción (Dirpan et al., 2023). El control sobre estos parámetros garantiza que los materiales mantengan su integridad y funcionalidad frente a la exposición a la humedad, gases y otros agentes ambientales (Westlake et al., 2022).

Recientemente, los compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales han atraído la atención de la comunidad científica, gracias a su potencial para integrarse de manera sostenible al medio ambiente y a sus notables propiedades fisicoquímicas (Maiti et al., 2022). La policaprolactona (PCL), un poliéster alifático sintético obtenido mediante la polimerización por apertura de anillo de la ϵ -caprolactona (Kayan & Kayan, 2023), es una alternativa biodegradable que ha sido investigada para aplicaciones de empaques gracias a su buena resistencia al impacto y elevada flexibilidad; esta última favorecida por su baja temperatura de transición vítrea (~ -60 °C) y su naturaleza semicristalina (Lyu et al., 2019). Además, su bajo punto de fusión ($\sim 58-64$ °C) (Oney-Montalvo et al., 2024) proporciona un amplio rango de procesamiento (Moll & Chiralt, 2024).

Por otro lado, la celulosa es el principal componente de las paredes celulares de las plantas. Destaca por ser renovable, de bajo costo, resistente y no tóxica (Marinho, 2025). Las fibras lignocelulósicas se han consolidado como una alternativa viable a las fibras sintéticas en compuestos con matrices poliméricas, debido a su disponibilidad, baja densidad y satisfactorias propiedades mecánicas; estos atributos dependen de factores como la naturaleza y geometría de las fibras, su orientación y la adhesión interfacial con la matriz (Kamarudin et al., 2022; McKay et al., 2024).

La permeabilidad es un parámetro crítico que determina la interacción de las películas plásticas con diversos medios (gases, vapores y líquidos) y, por ende, es fundamental para evaluar la seguridad y capacidad de almacenamiento de los materiales (Cheng et al., 2024). Según Yue y colaboradores (2024) (Yue et al., 2024) este parámetro depende de la composición y la estructura de la película, y está relacionada

con la densidad, la hidrofobicidad y la cristalinidad. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de fibras naturales en matrices como la PCL no solo mejora la biodegradabilidad, sino que también modula propiedades clave relacionadas con la barrera a gases y la resistencia mecánica (Ilyas et al., 2022; Jakubska et al., 2025; Saifullah et al., 2024). Sin embargo, la eficacia de estos biocompuestos depende en gran medida de la optimización de la unión interfacial entre el refuerzo y la matriz polimérica, así como del control de las condiciones de procesamiento durante la producción de los compuestos (Kamarudin et al., 2022; Mohammed Mohammed et al., 2022).

El empleo de técnicas de caracterización, como la espectroscopía FTIR y la microscopía electrónica, han permitido una comprensión más profunda de las interacciones químicas (por ejemplo, los puentes de hidrógeno entre PCL y las fibras de celulosa) y de los defectos estructurales que afectan la permeabilidad. Asimismo, el uso de métodos estadísticos como el Análisis de Varianza (ANOVA), facilita el establecimiento de una correlación cuantitativa entre parámetros experimentales (pH, conductividad) y la composición del material.

Por lo anterior, en este estudio se evaluó el desempeño mecánico y la permeabilidad de películas formadas por PCL y fibras de la hoja de maíz (PCL/ HM). Los resultados muestran una relación directa entre la concentración de fibras (HM), las variaciones en pH y la conductividad eléctrica; lo que resulta promisorio para sus posibles aplicaciones en el sector alimentario y agrícola, donde la combinación de biodegradabilidad, propiedades de barrera ajustables y resistencia mecánica son esenciales.

2. Metodología

2.1. Elaboración de películas de biocompuesto PCL/HM

Se formularon películas con diversos contenidos de fibras de hoja de maíz (HM) incorporadas en una matriz de policaprolactona (PCL), con una masa total final de 2 g por película y un espesor promedio de 0.13 cm. Primero, las fibras de HM se sometieron a un tratamiento de molienda mecánica de alta energía en un molino SPEX 8000D, a 2000 rpm para obtener un polvo fino. Posteriormente, el polvo de fibras de HM se dispersó en cloroformo y se incorporó en una disolución de PCL y cloroformo, con agitación a 60 °C, obteniéndose una suspensión homogénea que fue vertida en moldes para elaborar películas por evaporación del disolvente. Las muestras se sometieron a un secado en estufa de vacío, permitiendo la completa remoción del disolvente. Finalmente, las películas obtenidas se cortaron en probetas de dimensiones 5×1 cm para los ensayos mecánicos y de 1×1 cm para las pruebas de permeabilidad. La composición de las películas, expresada en porcentaje en peso de PCL y fibras de HM, se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición del biocompuesto PCL/HM.

Nombre de la muestra	Contenido de fibras de HM (%)	Contenido de PCL (%)
PCL/HM.2	2	98
PCL/HM.6	6	94
PCL/HM.9	9	91
PCL/HM.12	12	88
PCL/HM.25	25	75
PCL/HM.50	50	50

2.2. Evaluación mecánica

Los ensayos mecánicos se realizaron utilizando un texturómetro (Stable Micro Systems Texture Analyzer TA.XTplus, Scientific Instruments). Las probetas se sometieron a tracción a una velocidad de 50 mm/min, aplicándose una carga máxima de 490.33N. Se registraron parámetros como la fuerza tensil, la deformación y el módulo de Young, permitiendo la correlación de estos datos con el contenido de fibras de HM y la permeabilidad del material. El esfuerzo máximo (σ_{max}) se obtuvo directamente de la curva esfuerzo-deformación como el valor más alto de esfuerzo registrado durante el ensayo, correspondiente a la resistencia última del material (UTS).

2.3. Ensayo de permeabilidad

La permeabilidad de las películas se evaluó mediante una celda de difusión horizontal (Figura 1), operada a temperatura ambiente durante un periodo de 5 días, metodología que fue propuesta por el grupo de trabajo. En este aparato, las probetas se ubicaron de forma central entre dos compartimentos de igual volumen (20 mL cada uno) y un área de difusión definida de 1 cm². Se llenó el compartimento “donante” con una solución buffer a pH 7 (solución neutra) y el compartimento “receptor” con una solución al 3% (v/v) de ácido acético. Durante la etapa experimental, la celda se mantuvo en condiciones estáticas. Los parámetros de pH y conductividad eléctrica del compartimento receptor se midieron diariamente a la misma hora, utilizando equipos calibrados, con el objetivo de cuantificar la transferencia de especies a través de la película y evaluar el desempeño barrera del biocompuesto.



Figura 1: Celda de difusión empleada en este trabajo, del lado derecho la solución donante, del lado izquierdo la solución receptora.

3. Resultados y discusión

3.1. Evolución del pH en el compartimento receptor

Se evaluó la variación del pH en el compartimento receptor durante el experimento de permeabilidad, utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se consideraron como factores el tiempo (días) y la concentración de fibras de HM, siendo el pH la variable respuesta.

Los resultados indican que tanto el factor tiempo como la concentración de fibras de HM inciden significativamente en el pH (Prueba de Tukey, $p < 0.05$). Esto evidencia que los cambios en el pH del receptor dependen de ambos parámetros, reflejando cómo la formulación del biocompuesto y la duración del contacto con el medio ácido determinan la transferencia iónica a través del material.

El análisis mostró que durante los días 1 y 2 las variaciones en el pH fueron mínimas y no estadísticamente significativas, lo que sugiere que en las primeras 48 horas la actividad química y la degradación del biocompuesto son bajas. En contraste, los días 4 y 5 presentan valores significativamente distintos, indicando que la prolongación del contacto con el medio ácido intensifica los procesos de degradación e interacción química. El día 3 presenta un comportamiento intermedio, identificándose como un punto de transición entre la fase de estabilidad inicial y la etapa activa de cambio de pH (Tabla 2).

Tabla 2: Valores de pH en el receptor.

Día	Media	Agrupación
1	7.22	A
2	7.13	A
3	6.94	A B
4	6.83	B
5	6.73	B

Media con letra en común indica que son significativamente similares ($\alpha > 0.05$)

3.2. Efecto de la Concentración de Fibras de HM en el pH del Receptor

El análisis del efecto de la concentración de fibras de HM reveló que la muestra con 6% de HM (PCL/HM.6) exhibe un valor de pH significativamente inferior en el receptor en comparación con las otras formulaciones. Concretamente, la muestra de 6% se agrupa de manera independiente (Grupo B), mientras que las formulaciones con 2%, 9%, 12%, 25% y 50% de fibras de HM se agrupan conjuntamente (Grupo A) (Tabla 3).

Tabla 3: Valores de pH en el receptor según la concentración de fibras de HM en el biocompuesto.

HM ↑	Media
2	7.06 ^A
6	6.34 ^B
9	7.21 ^A
12	7.18 ^A
25	7.03 ^A
50	7.01 ^A
HM ↓	Media ↓
9	7.21 ^A
12	7.18 ^A
2	7.06 ^A
25	7.03 ^A
50	7.01 ^A
6	6.34 ^B

Media con letra como superíndice en común indica que son significativamente similares ($\alpha > 0.05$)

La disminución significativa del pH, observada en el tratamiento con 6% de HM, podría estar relacionada con su morfología particular debido al procesamiento y el espesor de la muestra (Yang et al., 2019). Durante la incorporación de fibras de HM a esta concentración en la matriz de PCL, se pudo generar el aumento de la porosidad y defectos estructurales (vacíos interfaciales, poros o microgrietas) producto de la incompatibilidad entre las fases y de los componentes de las fibras (celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente), las cuales poseen una alta capacidad de retención de agua, lo que permite la formación de poros que absorben agua (Elfaleh et al., 2023; Nukala et al., 2022). Estos defectos aumentan la rugosidad y favorecen la difusión de gases y agua, aumentando la permeabilidad del material (Hinestroza et al., 2020), promoviendo la difusión de iones desde el medio ácido hacia el medio neutro. Este aumento en la permeabilidad crea un entorno más amplio dentro del material, lo cual se traduce en la acidificación del medio neutro. Este comportamiento concuerda con estudios previos en los que se ha reportado que ciertos porcentajes de refuerzo lignocelulósico pueden influir en la formación de redes internas que afectan tanto las propiedades químicas como físicas del biocompuesto (Nair et al., 2018). La estabilidad relativa del pH en las demás concentraciones sugiere que en esos niveles la formación de la red interna o la acumulación de subproductos generados fue suficientemente marcada para no generar una alteración estadísticamente significativa.

3.3. Conductividad eléctrica

Durante el periodo de experimentación de 5 días se observó que la conductividad eléctrica disminuyó progresivamente. Este comportamiento se atribuye a la difusión de iones a través de las películas desde el compartimento de mayor concentración (medio ácido) hacia el de menor concentración (medio neutro), lo que resulta en una dilución iónica y, en consecuencia, en una disminución de la conductividad en el compartimento inicial. Este fenómeno se manifiesta en todas

las formulaciones, incluida la de PCL pura. Sin embargo, en la muestra PCL/HM.6 se registró un decremento de conductividad más marcado. Este resultado concuerda con lo observado en las micrográficas (Figura 6), donde se evidencian grietas que facilitan la presencia de canales de difusión adicionales (Siedlaczek et al., 2022).

En los materiales compuestos, elementos microestructurales como la interfaz matriz-fibra, los poros y las grietas pueden afectar significativamente el comportamiento de la difusión de la humedad. La presencia de estas discontinuidades en la matriz aumenta la difusividad, conforme a la ley de Fick, la cual relaciona la movilidad iónica y la conductividad eléctrica con la concentración de iones (Kuldeep et al., 2022; Mertgenç Yoldaş, 2025). A partir de los resultados se identifican tres posibles vías de difusión en el sistema: a través de la matriz polimérica, a lo largo de la interfaz matriz-fibra, y a través de la matriz-fibra. Por lo anterior, las investigaciones futuras podrían centrarse en el estudio de la interfaz matriz-fibra y sus entalpías de adsorción, para determinar los factores que influyen en el comportamiento de la difusión en estos biocompuestos.

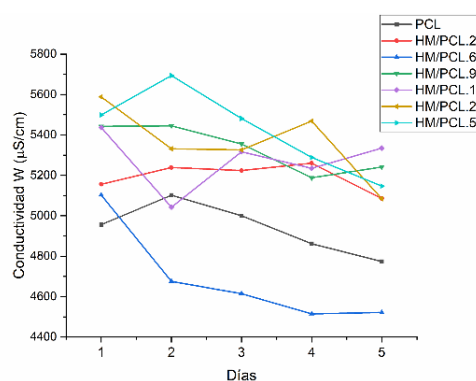


Figura 2: Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de la PCL pura y los biocompuestos de PCL reforzados con fibras de HM (diferentes concentraciones) mediciones en un periodo de 5 días.

3.4. Propiedades mecánicas

Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de los ensayos de tensión se presentan en la Figura 3. Los resultados indican una clara dependencia de las propiedades mecánicas respecto al contenido de fibras de HM incorporado en los biocompuestos PCL/HM. La formulación PCL/HM.2 exhibió el mejor desempeño, alcanzando un esfuerzo máximo de aproximadamente 14.5 MPa y una deformación de cerca del 5.5%, lo que refleja una excelente combinación entre resistencia y ductilidad.

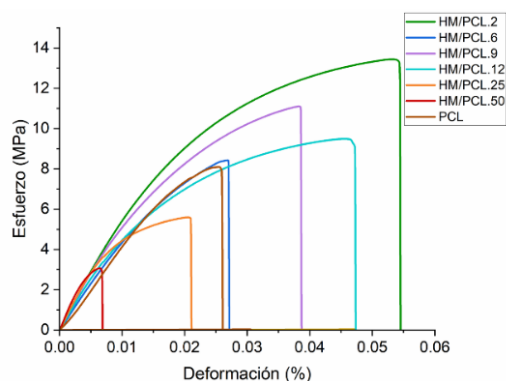


Figura 3: Curva de esfuerzo-deformación para los biocompuestos PCL/HM.

Al incrementar el contenido de fibras de HM a 6%, 9% y 12%, se observó una ligera disminución tanto en el esfuerzo como en la deformación, pero los valores se mantuvieron dentro de intervalos aceptables para aplicaciones estructurales ligeras.

En contraste, los biocompuestos con altas cargas de fibras de HM (25% y 50%) mostraron una marcada disminución en los valores obtenidos para su comportamiento mecánico, con esfuerzos máximos por debajo de los 6 MPa y una deformación limitada, lo cual evidencia un comportamiento frágil. Esta caída significativa puede atribuirse a una pobre dispersión o baja compatibilidad entre la matriz de PCL y las fibras de HM en altas concentraciones, lo que genera sitios de concentración de tensiones y facilita el inicio de grietas (Nasri et al., 2023), que se confirman en el análisis por microscopía electrónica de barrido. Los resultados sugieren que, bajo las condiciones empleadas de tratamiento (molienda mecánica), la adición de fibras de HM debe mantenerse por debajo del 15% para preservar las propiedades mecánicas del material biocompuesto.

La Figura 4 presenta los resultados de los ensayos de tensión realizados para los biocompuestos de PCL/HM a diferentes concentraciones. En la Figura 4a, correspondiente a la resistencia a la tensión, se observa que el valor máximo (~14 MPa) se alcanza con la incorporación del 2% en peso de fibras de HM. Este resultado indica que, en el sistema PCL/HM.2, la transferencia de esfuerzos desde la matriz hacia las fibras de HM es más eficiente, lo cual se atribuye a una adhesión interfacial favorable y a una dispersión homogénea del refuerzo dentro de la matriz polimérica. A este contenido de fibras de HM, la interacción matriz-refuerzo es lo suficientemente efectiva para favorecer la formación de posibles redes de percolación que facilitan un camino continuo para la transferencia de carga y permiten una distribución más uniforme de las tensiones dentro del material; por lo que estas condiciones explican el incremento observado en la resistencia mecánica del biocompuesto (Chen et al., 2023; Narkkun et al., 2023).

En conjunto, los resultados sugieren que el intervalo óptimo de contenido de fibras de HM se encuentra entre el 2 y 12 %, donde se maximiza el equilibrio entre la eficiencia del refuerzo y la integridad de la matriz. A partir de este punto, la resistencia disminuye progresivamente con el incremento del contenido de fibras de HM, siendo la reducción más pronunciada a partir del 25% y hasta alcanzar un valor mínimo de aproximadamente 3 MPa con el 50% de refuerzo. Esta reducción se asocia principalmente a fenómenos de aglomeración de las fibras y la generación de concentradores de esfuerzo que comprometen la continuidad de la matriz polimérica, provocando fallas prematuras (Shaik et al., 2025).

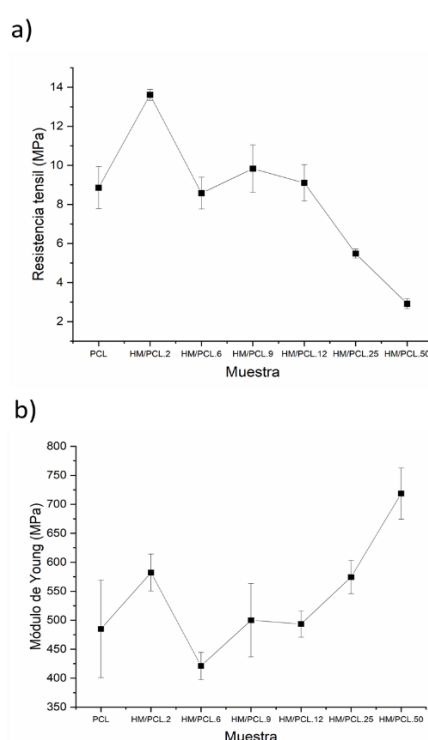


Figura 4: a) Diagrama de Resistencia tensil y b) Diagrama del Módulo de Young para los biocompuestos PCL/HM.

De esta manera, se demuestra que la incorporación controlada de fibras de HM puede mejorar de forma significativa la resistencia a tensión de los biocompuestos de PCL. Sin embargo, un exceso de contenido de refuerzo puede provocar una disminución del desempeño del biocompuesto, atribuido a la saturación de fibras de HM en la matriz de PCL, lo que afecta negativamente el rendimiento mecánico de los compuestos (Vidakis et al., 2024).

Por otro lado, el módulo de Young (Figura 4b) muestra una tendencia opuesta. Aunque presenta cierta variabilidad en bajas concentraciones de fibra, a partir del 12% se evidencia un aumento sostenido, alcanzando un valor máximo de ~730 MPa con el 50% de contenido de fibras de HM. En conjunto, estos resultados revelan una relación inversa entre resistencia

y rigidez: el refuerzo con fibras de HM incrementa la rigidez del biocompuesto, pero también reduce su resistencia a la tensión una vez superado un umbral crítico de carga. Esta interacción sugiere que la elección del porcentaje óptimo de refuerzo debe equilibrar cuidadosamente ambos parámetros, según los requerimientos específicos de la aplicación final.

El comportamiento mecánico observado se relaciona directamente con la microestructura del biocompuesto en función de la cantidad de carga incorporada (Ikramullah et al., 2024). En particular, la formulación con 2% en peso de fibras de HM generó un aumento simultáneo en la resistencia a la tensión (~14 MPa) y en el módulo de Young (~370 MPa) respecto al PCL sin refuerzo. Este comportamiento puede atribuirse a una adecuada dispersión de las fibras de HM en la matriz, lo cual permite una eficiente transferencia de cargas, sin inducir aglomeraciones ni defectos estructurales (Omran et al., 2021).

A medida que el contenido de fibras de HM aumenta (6–12%), se observa una disminución gradual en la resistencia mecánica, aunque todavía dentro de valores funcionales. No obstante, a partir del 15% y hasta el 50%, la caída en resistencia se acentúa (~3–6 MPa), mientras que el módulo de Young continúa incrementándose; lo que indica un refuerzo efectivo en términos de rigidez, pero con una pérdida de ductilidad. Este efecto es comúnmente reportado en biocompuestos con altos niveles de fibras lignocelulósicas (Serra-Parareda et al., 2021).

El resultado observado con el 2% de fibras de HM es particularmente relevante. A esta baja concentración, las fibras de HM presentan una morfología refinada y una mayor superficie específica, lo que favorece el anclaje mecánico dentro de la matriz polimérica (Teixeira et al., 2022). Esta condición optimiza la eficiencia de la interfaz matriz-refuerzo, reduciendo la formación de vacíos o zonas de concentración de esfuerzos, y permitiendo mejoras concurrentes en resistencia y rigidez, sin comprometer la integridad estructural del biocompuesto (Shetty et al., 2024).

Finalmente, las barras de error corresponden a la desviación estándar de cinco réplicas independientes ($n = 5$). Como se discutió anteriormente, la dispersión observada se atribuye a la heterogeneidad inherente del refuerzo lignocelulósico de las fibras de HM (variación en tamaño, morfología y distribución de las fibras), así como a microheterogeneidades locales asociadas al mezclado y a posibles aglomerados a mayores contenidos de refuerzo. A pesar de esta variabilidad, la tendencia global de las propiedades mecánicas es consistente entre formulaciones.

3.5. Espectroscopía FTIR

La Figura 5 presenta los espectros de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) correspondientes a los biocompuestos PCL/HM con diferentes porcentajes de carga, en comparación con las señales obtenidas para la fibra tratada por molienda mecánica de alta energía de las fibras de HM y el polímero puro (PCL). En general, ambos gráficos revelan la presencia de las bandas características de cada componente individual, así como cambios asociados a su interacción dentro del biocompuesto.

En la Figura 5a se muestran los espectros FT-IR de las películas de PCL y de los biocompuestos PCL/HM obtenidos antes del ensayo de permeabilidad. Para la PCL se identifican las bandas características en ≈ 2932 y ≈ 2862 cm^{-1} , correspondientes a las vibraciones longitudinales del grupo $-\text{CH}_2$; una banda intensa en ≈ 1720 cm^{-1} asignada a vibraciones longitudinales del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$); la señal en ≈ 1291 cm^{-1} atribuida a las vibraciones longitudinales de los enlaces $\text{C}-\text{O}$ y $\text{C}-\text{C}$ de la fase cristalina; las bandas que se observan a 1237 y 1165 cm^{-1} se asocian a vibraciones asimétricas correspondientes a los enlaces $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$ y $\text{C}-\text{C}$ de la fase amorfa (Holešová et al., 2021).

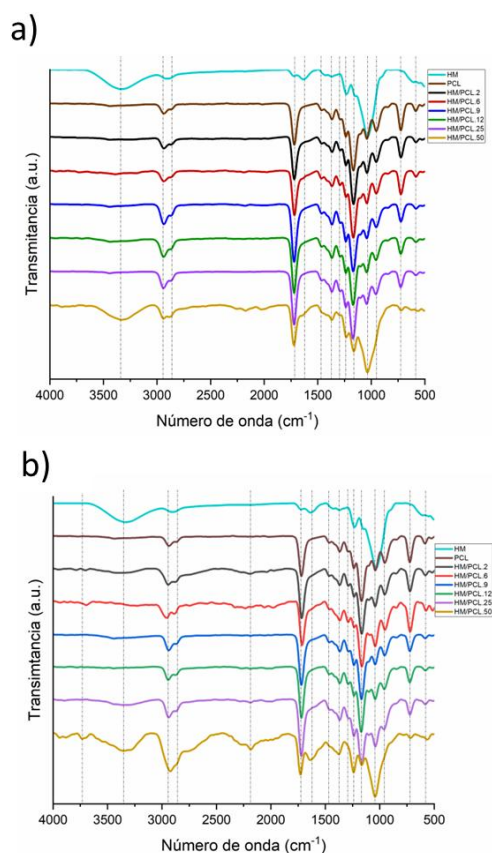


Figura 5: Espectros de FTIR de a) PCL/HM antes del ensayo de permeabilidad y b) después del ensayo de permeabilidad.

3.6. Microscopía Electrónica de Barrido

La Figura 6 muestra las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) de la superficie de fractura de biocompuestos de PCL/HM con diferentes concentraciones de fibras de HM.

La micrografía (Figura 6a) de PCL pura, muestra una superficie homogénea, con formación de esferulitas, resultantes del proceso de cristalización del polímero y libre de defectos aparentes, lo cual es típico para la PCL (Kumalo et al., 2025; Li et al., 2017; Yu et al., 2017). Para el biocompuesto con 2% de fibras de HM (Figura 6b), se observa una distribución uniforme de pequeñas cavidades que podrían corresponder a la tracción en zonas cercanas a las fibras embebidas. No se observan aglomerados ni vacíos grandes, muy similar a la morfología superficial de la PCL.

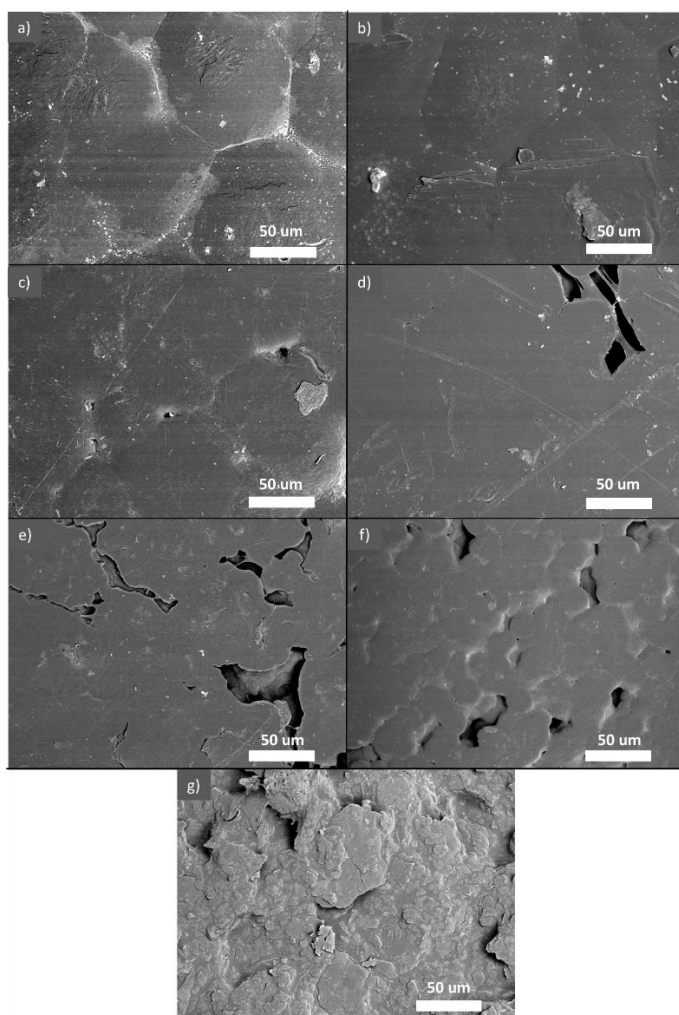


Figura 6: Imágenes de MEB de los biocompuestos de PCL/HM después del tratamiento; a) PCL, b) 2%, c) 6%, d) 9%, e) 12%, e) 25% y f) 50%.

Con el aumento en la cantidad de fibras de HM (Figuras 6c y 6d, 6% y 12% respectivamente), comienzan a evidenciarse defectos morfológicos más notorios. Esta morfología está

correlacionada con el incremento observado en resistencia mecánica y el módulo de Young, como se discutió previamente. En particular, en 6c se observan cavidades mayores, posiblemente asociadas al desanclaje debido a la pobre adherencia entre partículas. En 6d, se evidencia una mayor frecuencia y amplitud de vacíos, lo que sugiere la aparición de aglomeraciones y discontinuidades en la matriz; estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo y contribuyen a la disminución progresiva de la resistencia tensil, lo cual concuerda con lo observado experimentalmente.

En las micrografías 6e (25%) y 6f (50%) se aprecia una superficie altamente heterogénea, con porosidad significativa y zonas frágiles, indicativas de un exceso de fibras de HM que migra a la superficie del material. En particular, en 6f se observan regiones fibrosas sobresalientes y una superficie rugosa y fracturada, lo que sugiere una saturación del sistema con fibras de HM, impidiendo una distribución adecuada. Estos defectos explican el incremento en permeabilidad observado, coincidiendo con estudios que atribuyen la formación de poros debidos a la segregación de fibras a altas concentraciones (Mehdikhani et al., 2019).

En conjunto, estas observaciones morfológicas respaldan los resultados mecánicos obtenidos, donde una baja concentración de fibras de HM (2%) mejora las propiedades del biocompuesto gracias a una dispersión homogénea y buen anclaje mecánico, mientras que concentraciones elevadas inducen defectos que disminuyen la resistencia a la tracción y la integridad estructural del material.

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra que la incorporación de fibras de la hoja de maíz en la matriz de policaprolactona (PCL) tiene un impacto significativo en la permeabilidad y las propiedades mecánicas de las películas del biocompuesto. Se evidenció que, en formulaciones con bajas concentraciones de fibra (2–12%), se forma una estructura compacta que disminuye la permeabilidad, mientras que formulaciones con altas concentraciones (25–50%) generan poros y canales que facilitan el paso de iones y otras especies, aumentando notablemente la permeabilidad del material.

Estas películas ofrecen la ventaja adicional de ser biodegradables de acuerdo con estudios realizados por el grupo de trabajo, que serán publicados posteriormente, lo que resulta atractivo tanto para el sector del empaque alimentario como para aplicaciones en agricultura. La optimización en la carga de fibras de hoja de maíz se revela como un factor clave para ajustar el desempeño funcional de los biocompuestos, abriendo nuevas perspectivas para el desarrollo de materiales sostenibles y de alto rendimiento.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la SECIHTI por el apoyo financiero otorgado mediante la beca doctoral 1034245.

Asimismo, expresan su agradecimiento al CITNOVA por el financiamiento al proyecto CITNOVA DDCTI/FH-DCI-138 y por la beca para la estancia doctoral de corta duración y al CIIDIT-UANL por la infraestructura proporcionada, la cual contribuyó de manera significativa al desarrollo de este trabajo. De igual forma, se agradece el apoyo del Dr. Oscar Javier Hernández Ortiz por la revisión inicial del trabajo.

Referencias

- Chen, J., Huang, Y., Deng, L., Jiang, H., Yang, Z., Yang, R., & Wu, D. (2023). Preparation and research of PCL/cellulose composites: Cellulose derived from agricultural wastes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123785>
- Cheng, J., Gao, R., Zhu, Y., & Lin, Q. (2024). Applications of biodegradable materials in food packaging: A review. In *Alexandria Engineering Journal* (Vol. 91, pp. 70–83). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.080>
- Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M. M., & Holcman, V. (2025). Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. In *Polymers* (Vol. 17, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym17141981>
- Dimassi, S. N., Hahladakis, J. N., Yahia, M. N. D., Ahmad, M. I., Sayadi, S., & Al-Ghouthi, M. A. (2022). Degradation-fragmentation of marine plastic waste and their environmental implications: A critical review. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 15, Issue 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2022.104262>
- Dirpan, A., Ainani, A. F., & Djalal, M. (2023). A Review on Biopolymer-Based Biodegradable Film for Food Packaging: Trends over the Last Decade and Future Research. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym15132781>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. In *Results in Engineering* (Vol. 19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Hinestroza, H. P., Urena-Saborío, H., Zurita, F., de León, A. A. G., Sundaram, G., & Sulbarán-Rangel, B. (2020). Nanocellulose and polycaprolactone nanospun composite membranes and their potential for the removal of pollutants from water. *Molecules*, 25(3). <https://doi.org/10.3390/molecules25030683>
- Holešová, S., Čech Barabaszová, K., Hundáková, M., Ščuková, M., Hrabovská, K., Jozsko, K., Antonowicz, M., & Gzik-Zroska, B. (2021). Development of novel thin polycaprolactone (PCL)/clay nanocomposite films with antimicrobial activity promoted by the study of mechanical, thermal, and surface properties. *Polymers*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/polym13183193>
- Ikrumullah, I., Gapatra, R., Haris Ananda, S., Kurniawan, R., Fonna, S., Rizal, S., & Huzni, S. (2024). Interfacial stress distribution analysis of natural fiber-reinforced epoxy composites: a finite element approach. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, 22(6), 2024–2035. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
- Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y. M., Norrahim, M. N. F., Misenan, M. S. M., Jenol, M. A., Samsudin, S. A., Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Supian, A. B. M., Bangar, S. P., Nadlene, R., Sharma, S., & Omran, A. A. B. (2022). Natural Fiber-Reinforced Polycaprolactone Green and Hybrid Biocomposites for Various Advanced Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14010182>
- Jakubská, J., Hudecki, A., Kluska, D., Grzybek, P., Gołombek, K., Pakiel, W., Spałek, H., Włodarczyk, P., Kolano-Burian, A., & Dudek, G. (2025). Innovative Multilayer Biodegradable Films of Chitosan and PCL Fibers for Food Packaging. *Foods*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/foods14142470>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Kayan, G. Ö., & Kayan, A. (2023). *Polycaprolactone Composites/Blends and Their Applications Especially in Water Treatment*. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.0709.v1>
- Kuldeep, Manzanares, J. A., Kauranen, P., Mousavihashemi, S., & Murtomäki, L. (2022). Determination of Ionic Diffusion Coefficients in Ion-Exchange Membranes: Strong Electrolytes and Sulfates with Dissociation Equilibria. *ChemElectroChem*, 9(11). <https://doi.org/10.1002/celec.202200403>
- Kumalo, F. I., Malimabe, M. A., Mosoabisane, M. F. T., & Gumede, T. P. (2025). Development and Characterization of PBS/EA Cellulose and PCL/EA Cellulose Biocomposites: Structural, Morphological, and Thermal Insights for Sustainable Applications. *Polymers*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/polym17070971>
- Laycock, B., Pratt, S., & Halley, P. (2023). A perspective on biodegradable polymer biocomposites - from processing to degradation. *Functional Composite Materials*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00048-w>
- Li, Y., Wang, Z., & He, T. (2017). Morphological control of polymer spherulites via manipulating radial lamellar organization upon evaporative crystallization: A mini review. In *Crystals* (Vol. 7, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst7040115>
- Lyu, J. S., Lee, J. S., & Han, J. (2019). Development of a biodegradable polycaprolactone film incorporated with an antimicrobial agent via an extrusion process. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56757-5>
- Maiti, S., Islam, M. R., Uddin, M. A., Afroj, S., Eichhorn, S. J., & Karim, N. (2022). Sustainable Fiber-Reinforced Composites: A Review. In *Advanced Sustainable Systems* (Vol. 6, Issue 11). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/adsu.202200258>
- Marinho, E. (2025). Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications. In *Sustainable Chemistry for the Environment* (Vol. 11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100283>
- McKay, I., Vargas, J., Yang, L., & Felfel, R. M. (2024). A Review of Natural Fibres and Biopolymer Composites: Progress, Limitations, and Enhancement Strategies. In *Materials* (Vol. 17, Issue 19). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma17194878>
- Mehdikhani, M., Gorbatikh, L., Verpoest, I., & Lomov, S. V. (2019). Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. In *Journal of Composite Materials* (Vol. 53, Issue 12, pp. 1579–1669). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/0021998318772152>
- Mertgenç Yoldaş, D. (2025). Investigation of Diffusion Induced Fiber-Matrix Interface Damages in Adhesively Bonded Polymer Composites. *Polymers*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/polym17121672>
- Mohammed Mohammed, MSM Rasidi, Aeshah M. Mohammed, Rozyanty Rahman, Azlin F. Osman, Tijiani Adam, Bashir O. Betar, & Omar S. Dahham. (2022). *Mohammed_2022*. *BioResources*. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>
- Moll, E., & Chiralt, A. (2024). Improving Thermo-Sealing of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by Blending with Polycaprolactone. *Polymers*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/polym16233255>
- Nair, S. S., Chen, H., Peng, Y., Huang, Y., & Yan, N. (2018). Poly(lactic Acid) Biocomposites Reinforced with Nanocellulose Fibrils with High Lignin Content for Improved Mechanical, Thermal, and Barrier Properties. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(8), 10058–10068. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01405>
- Narkkun, T., Kraithong, W., Ruangdit, S., Klayson, C., Faungnawakij, K., & Itthibenchapong, V. (2023). Pebax/Modified Cellulose Nanofiber Composite Membranes for Highly Enhanced CO₂/CH₄ Separation. *ACS Omega*, 8(48), 45428–45437. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04800>
- Nasri, K., Loranger, É., & Toubal, L. (2023). Effect of cellulose and lignin content on the mechanical properties and drop-weight impact damage of injection-molded polypropylene-flax and -pine fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 57(21), 3347–3364. <https://doi.org/10.1177/00219983231186208>
- Nukala, S. G., Kong, I., Patel, V. I., Kakarla, A. B., Kong, W., & Buddrick, O. (2022). Development of Biodegradable Composites Using Polycaprolactone and Bamboo Powder. *Polymers*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/polym14194169>
- Omran, A. A. B., Mohammed, A. A. B., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., Kolor, S. S. R., & Petrú, M. (2021). Micro- and nanocellulose in polymer composite materials: A review. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 2, pp. 1–30). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13020231>
- Oney-Montalvo, J. E., Dzib-Cauich, D. A., De Jesús Ramírez-Rivera, E., Cabal-Prieto, A., & Can-Herrera, L. A. (2024). Applications of polycaprolactone in the food industry: A review. In *Czech Journal of Food Sciences* (Vol. 42, Issue 2, pp. 77–84). Czech Academy of Agricultural Sciences. <https://doi.org/10.17221/200/2023-CJFS>
- Pfohl, P., Wagner, M., Meyer, L., Domercq, P., Praetorius, A., Hüffer, T., Hofmann, T., & Wohlleben, W. (2022). Environmental Degradation of Microplastics: How to Measure Fragmentation Rates to Secondary Micro-

- and Nanoplastic Fragments and Dissociation into Dissolved Organics. *Environmental Science and Technology*, 56(16), 11323–11334. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01228>
- Saifullah, A., Chacko, N. G., Dhakal, H. N., Khan, S. H., Sarker, F., & Zhang, Z. (2024). Valorisation of Agricultural Residue Bio-Mass Date Palm Fibre in Dry-Blended Polycaprolactone (PCL) Bio-Composites for Sustainable Packaging Applications. *Waste and Biomass Valorization*, 15(10), 5805–5817. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02550-z>
- Serra-Parareda, F., Vilaseca, F., Espinach, F. X., Mutjé, P., Delgado-Aguilar, M., & Tarrés, Q. (2021). Stiffening potential of lignocellulosic fibers in fully biobased composites: The case of abaca strands, spruce tmp fibers, recycled fibers from onp and barley tmp fibers. *Polymers*, 13(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/polym13040619>
- Shaik, M. S., Sankara Subramanian, H., B. R. K., Suyambulingam, I., Senthamaraiannan, P., & Kumar, R. (2025). A Review on Fiber Properties, Manufacturing, and Crashworthiness of Natural Fiber-Reinforced Composite Structures. In *Journal of Natural Fibers* (Vol. 22, Issue 1). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2520845>
- Shetty, S., Salins, S. S., & Sachidananda, H. K. (2024). Design and characterization of natural fiber reinforced cotton-epoxy composites. *Discover Applied Sciences*, 6(12). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06402-2>
- Siedlaczek, P., Sinn, G., Peter, P., Wan-Wendner, R., & Lichtenegger, H. C. (2022). Characterization of moisture uptake and diffusion mechanisms in particle-filled composites. *Polymer*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.124799>
- Teixeira, F. P., Lima, V. N., Moutinho, D. J. C., & Fujiyama, R. T. (2022). Mechanical properties and fractography of cement-based composites reinforced by natural piassava and jute fibers. *Ceramica*, 68(385), 60–66. <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853174>
- Vidakis, N., Petousis, M., Michailidis, N., David, C., Mountakis, N., Papadakis, V., Sfakiotakis, E., Sagris, D., & Argyros, A. (2024). Optimization of cellulose nanocrystal (CNC) concentration in polycaprolactone bio-composites for bio-plotting: a robust interpretation of the reinforcement mechanisms. *Cellulose*, 31(6), 3657–3680. <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05851-7>
- Westlake, J. R., Tran, M. W., Jiang, Y., Zhang, X., Burrows, A. D., & Xie, M. (2022). Biodegradable Active Packaging with Controlled Release: Principles, Progress, and Prospects. In *ACS Food Science and Technology* (Vol. 2, Issue 8, pp. 1166–1183). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.2c00070>
- Yang, J., Ching, Y. C., & Chuah, C. H. (2019). Applications of lignocellulosic fibers and lignin in bioplastics: A review. In *Polymers* (Vol. 11, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym11050751>
- Yu, C., Xie, Q., Bao, Y., Shan, G., & Pan, P. (2017). Crystalline and spherulitic morphology of polymers crystallized in confined systems. In *Crystals* (Vol. 7, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/cryst7050147>
- Yue, S., Zhang, T., Wang, S., Han, D., Huang, S., Xiao, M., & Meng, Y. (2024). Recent Progress of Biodegradable Polymer Package Materials: Nanotechnology Improving Both Oxygen and Water Vapor Barrier Performance. In *Nanomaterials* (Vol. 14, Issue 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nano14040338>