

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con fibras de *Elaeis guineensis*

Optimization and characterization of PLA biocomposites with fibers of *Elaeis guineensis*

Emilio Pérez Pacheco ¹
Carlos Rolando Ríos Soberanis ²
Olivia Guadalupe Ortiz Cel ³

RESUMEN

El impacto ambiental generado por residuos sólidos ha impulsado el desarrollo de materiales sostenibles. Este estudio evalúa biocompuestos elaborados con ácido poliláctico (PLA) reforzado con fibras del raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), un residuo agroindustrial subutilizado. Se incorporaron fibras cortas y whiskers de celulosa, tratadas térmica y químicamente, alcanzando una pureza celulósica del 48%. Las propiedades térmicas, estructurales y mecánicas se analizaron mediante FTIR, TGA, DSC y SEM. La adición de fibras mejoró el módulo de elasticidad del PLA hasta en un 10%; sin embargo, a una concentración del 30%, la resistencia a la tracción disminuyó por baja compatibilidad interfacial. Los análisis térmicos evidenciaron buena estabilidad y comportamiento de fusión influenciado por el contenido de refuerzo. Los resultados confirman la viabilidad técnica de emplear fibras de palma africana como refuerzo en matrices biodegradables, promoviendo la valorización de residuos agrícolas y el diseño de materiales poliméricos ecológicos.

PALABRAS CLAVES: Biocompuestos; Ácido poliláctico (PLA); Fibra de raquis de palma africana; propiedades mecánicas; Sostenibilidad.

Fecha de recepción: 21 de mayo, 2025.

Fecha de aceptación: 02 de septiembre, 2025.

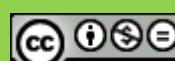
ABSTRACT

The environmental impact caused by solid waste has driven the development of sustainable materials. This study evaluates biocomposites made from polylactic acid (PLA) reinforced with fibers

¹ Universidad Modelo, Centro de Investigaciones Silvio Zavala, 97305, Mérida Yucatán, México, emilioperez@modelo.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

² Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Chuburná de Hidalgo; CP 97205, Mérida, Yucatán, México. rolando@cicy.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3915-7331>

³ Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocessos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México. ogortiz@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3159-457X>



Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

from the African palm rachis (*Elaeis guineensis* Jacq.), an underutilized agro-industrial byproduct. Short fibers and cellulose whiskers, thermally and chemically treated, were incorporated, achieving a cellulose purity of 48%. Thermal, structural, and mechanical properties were analyzed using FTIR, TGA, DSC, and SEM. The addition of fibers improved the elastic modulus of PLA by up to 10%; however, at a 30% concentration, tensile strength decreased due to poor interfacial compatibility. Thermal analysis revealed good stability and fusion behavior influenced by the reinforcement content. The results confirm the technical feasibility of using African palm fibers as reinforcement in biodegradable matrices, promoting the valorization of agricultural waste and the development of environmentally friendly polymeric materials.

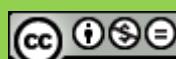
KEYWORDS: Biocomposites; Polylactic acid (PLA); African palm rachis fiber; mechanical properties; Sustainability.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el incremento sostenido de residuos sólidos ha provocado un serio problema ambiental a nivel global, impulsando la investigación en nuevos materiales que ofrezcan soluciones sostenibles y ecológicas (TG et al., 2023). Dentro de este contexto, los materiales biocompuestos, definidos como materiales formados por una matriz polimérica biodegradable y con refuerzos de origen natural, han adquirido relevancia en la ciencia de materiales gracias a su bajo impacto ambiental, renovabilidad y potencial en aplicaciones estructurales y no estructurales (Dhakal et al., 2024).

Uno de los polímeros más destacados en este campo es el ácido poliláctico (PLA), un termoplástico biodegradable derivado de recursos naturales como el maíz o la caña de azúcar, cuya popularidad ha crecido debido a su procesabilidad y compatibilidad con técnicas de fabricación convencionales (Jayanthi et al., 2024). A pesar de sus ventajas, el PLA presenta limitaciones intrínsecas en cuanto a sus propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia al impacto, lo que ha motivado la incorporación de refuerzos naturales, principalmente fibras lignocelulósicas, con el fin de mejorar su rendimiento (Leite-Barbosa et al., 2024). Estas fibras, obtenidas de residuos agroindustriales como el bagazo de caña, cáscaras de frutas o tallos vegetales, poseen una elevada relación resistencia/peso, baja densidad y buena biodegradabilidad, lo que las hace idóneas para el diseño de materiales compuestos sostenibles (Babu, 2024). Entre las fibras naturales de interés, los residuos del raquis de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) han emergido como una fuente abundante, infroutilizada y rica en celulosa. Este residuo se genera en grandes volúmenes como subproducto del proceso de extracción de aceite, especialmente en regiones tropicales como América Latina, África y el sudeste asiático, donde la palma aceitera es un cultivo dominante (Ajayi et al., 2025). En países como México y Colombia, los residuos del raquis son comúnmente desechados o utilizados de forma limitada como fertilizante o biomasa para combustión, desaprovechando su potencial como refuerzo mecánico en compuestos poliméricos (Bharat et al., 2025).

Los reportes en la literatura muestran un avance significativo en la caracterización de fibras vegetales aplicadas a matrices de PLA. No obstante, persisten vacíos importantes en torno a la optimización del tratamiento químico y físico de estas fibras para lograr una adecuada compatibilidad interfacial con el polímero (Yeo et al., 2024). Asimismo, estudios previos han demostrado que las propiedades térmicas y mecánicas de los biocompuestos están directamente relacionadas con el tipo de tratamiento aplicado a las fibras, su morfología, contenido de celulosa y su proporción en la matriz



Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con fibras de *Elaeis guineensis*

(Jayanthi et al., 2024). En este sentido, trabajos como los de Ajayi et al. (2025) han abordado la obtención de celulosa purificada a partir de residuos de palma, pero pocos han explorado su implementación dual como fibras cortas y como whiskers nanocelulósicos dentro de un mismo sistema biocompuesto.

Este estudio destaca por valorizar residuos agroindustriales, transformándolos en materiales funcionales con valor agregado. Contribuye al ODS 12 sobre producción y consumo responsables, y ofrece aplicaciones tecnológicas en envases biodegradables, diseño automotriz ecológico y biomateriales no estructurales donde se requiere biodegradabilidad y bajo impacto ambiental (Leite-Barbosa et al., 2024).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar biocompuestos de ácido poliláctico (PLA) reforzados con fibras del raquis de palma africana en forma de fibra corta y nanocrstales de celulosa. Se aplicaron tratamientos químicos (hidrólisis, blanqueamiento y descomposición alcalina) y los biocompuestos se procesaron por extrusión y termocompresión. Se evaluaron propiedades mecánicas, térmicas (DSC, TGA) y estructurales (FTIR) para analizar compatibilidad interfacial y morfología de fractura.

Hipótesis

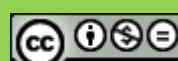
La incorporación de fibras tratadas químicamente del raquis de palma africana en matrices de PLA mejorará las propiedades mecánicas y térmicas del biocompuesto en comparación con PLA sin refuerzo, siempre que exista una adecuada compatibilidad interfacial entre fases.

Variables

- Variable independiente: Tipo y concentración de refuerzo (fibra desfibrada -DF- o celulosa purificada -CF- en proporciones de 10 %, 20 % y 30 %).
- Variables dependientes:
 - Propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, módulo de elasticidad)
 - Propiedades térmicas (temperatura de degradación, temperatura de fusión, T_g y T_c)
 - Compatibilidad interfacial (identificada mediante FTIR y análisis morfológico)
- Variables controladas: Tipo de matriz (PLA 2002 D), método de procesado (extrusión y termocompresión), condiciones de secado, velocidad de tracción.

JUSTIFICACIÓN

El aumento en la generación de residuos agroindustriales, especialmente en regiones con alta producción de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), plantea una necesidad urgente de estrategias sostenibles para su aprovechamiento. Paralelamente, la creciente demanda de materiales biodegradables ha impulsado el interés en biocompuestos como alternativa a los polímeros sintéticos, que presentan baja degradabilidad y alto impacto ambiental. El ácido poliláctico (PLA), por su origen renovable, es una matriz prometedora; no obstante, su desempeño mecánico y térmico es limitado. La incorporación de fibras naturales puede mejorar estas propiedades, aunque persisten desafíos en la compatibilidad fibra-matriz. En este contexto, el raquis de palma africana, rico en celulosa y poco valorizado, surge como un refuerzo potencial para desarrollar biocompuestos funcionales. Este estudio se justifica al proponer una solución técnica y ambiental mediante el uso de residuos lignocelulósicos en materiales sostenibles, alineándose con principios de economía circular y contribuyendo a sectores como el embalaje, automotriz y construcción ligera.



Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

METODOLOGÍA

Materiales

La fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) se obtuvo de la empresa Agroindustrias de Palenque S.A. de C.V. Se emplearon dos tipos de refuerzo: fibra desfibrada (DF) y fibra de celulosa (CF). La DF fue lavada con agua destilada, secada a temperatura ambiente, desfibrada manualmente, cortada en segmentos de ~30 cm y secada en estufa a 50 °C durante 24 h. Posteriormente se molió en molino de cuchillas tipo Wiley (Brabender®) y se tamizó con malla 40 (Figura 1a). La CF se obtuvo mediante el método descrito por Cazaurang-Martínez et al. (1990), también reportado por Pech-Cohuo et al. (2018), utilizando ácido sulfúrico, hidróxido de sodio (Sigma Aldrich®) e hipoclorito de sodio (CLORALEX®). Para la matriz del biocompuesto se utilizó poli(ácido láctico) (PLA) 2002 D de NatureWorks®. Las fibras fueron incorporadas como refuerzo con el objetivo de evaluar su efecto en las propiedades estructurales, térmicas y mecánicas del material final.



Figura 1. Fibras utilizadas como refuerzo de PLA. a) fibra desfibrada (DF), b) fibra de celulosa (CF).

Método

Extracción de fibras de celulosa

Se utilizaron 100 g de fibra de raquis de palma africana para obtener celulosa. Las fibras se trajeron con ácido sulfúrico al 1% v/v a 100 °C durante 1 h y luego se lavaron con agua destilada. Posteriormente, se sumergieron en hipoclorito de sodio al 3.5% w/v hasta alcanzar un pH de 9.2, seguido de un nuevo lavado. Despues, se trajeron con hidróxido de sodio al 20% w/v, con agitación constante a 1200 rpm por 3 h. Para el blanqueo final, se usó hipoclorito de sodio al 0.5% w/v bajo las mismas condiciones de agitación durante 1 h. Finalmente, las fibras fueron enjuagadas y secadas a temperatura ambiente durante 24 h.

Análisis de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

Con el propósito de identificar los grupos funcionales presentes en la estructura molecular de las fibras analizadas, se empleó espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier mediante reflectancia total atenuada (FTIR-ATR). El análisis se aplicó tanto a las muestras de fibra cruda de *Elaeis guineensis* Jacq. (palma africana) como a las fibras purificadas de celulosa (CF). Los espectros fueron obtenidos utilizando un espectrofotómetro modelo Nicolet 8700, operado en el rango de número de onda de 4000 a 650 cm⁻¹, con una resolución de 4 cm⁻¹. Todos los análisis se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

Análisis Termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica de las fibras se evaluó mediante análisis termogravimétrico (TGA) para determinar su temperatura de descomposición. Se analizaron fibras crudas de *Elaeis guineensis* Jacq. y celulosa purificada, utilizando un equipo TGA-7 (Perkin-Elmer) bajo atmósfera de nitrógeno (50 mL/min), desde 30 °C hasta 700 °C a 10 °C/min.

Elaboración de Materiales Biocompuestos

Los biocompuestos se elaboraron con PLA 2002 D como matriz y dos tipos de refuerzo: fibra corta (DF) del raquis de palma africana y fibras de celulosa (CF) en forma de whiskers, en concentraciones de 10 %, 20 % y 30 %. Antes de la extrusión, el PLA y las fibras se secaron a 85 °C durante 6 h para evitar degradación por hidrólisis. La mezcla se realizó mediante extrusión en una PRISM USA LAB 16 (Thermo Electron Corp.) con perfil de temperatura 140–170–180–160–150 °C y velocidad del husillo de 100 rpm. El material extruido se peletizó y moldeó por termocompresión en prensa hidráulica Carver 3912, empleando un molde de acero de 120 × 120 × 1 mm. El moldeo se realizó a 160 °C y 48.3 MPa durante 8 min. Posteriormente, se enfrió con agua y se extrajeron las placas, de las cuales se cortaron especímenes tipo IV según la norma ASTM D638 para pruebas mecánicas.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El comportamiento térmico se evaluó mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) con un equipo PerkinElmer Diamond. Las muestras se calentaron desde temperatura ambiente hasta 500 °C a 10 °C/min en atmósfera de aire a fin de identificar las transiciones térmicas.

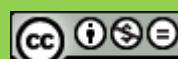
Propiedades Mecánicas

La adherencia interfacial en los biocompuestos DF/PLA y CF/PLA se evaluó mediante ensayos de tracción uniaxial en una máquina Shimadzu AGS-X (1 kN) a 1 mm/min. Esta técnica permitió analizar la resistencia mecánica y la calidad de interacción entre la matriz y el refuerzo fibroso.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Microscopía electrónica de barrido por transformada de Fourier

El espectro de FTIR se muestra en la Figura 2. Estos resultados de FTIR permitieron identificar los grupos funcionales característicos presentes en las fibras de raquis de palma africana antes y después del tratamiento químico, así como su interacción con la matriz polimérica de ácido poliláctico (PLA). En el espectro correspondiente a las fibras sin tratar, se observa una banda ancha e intensa alrededor de los 3330 cm⁻¹, atribuible a la vibración de elongación del grupo hidroxilo (–OH), típico de la celulosa, hemicelulosa y lignina, indicando una alta presencia de enlaces de hidrógeno. Esta banda disminuye significativamente en las fibras tratadas, lo que sugiere una eliminación parcial de impurezas y componentes amorfos durante el proceso de extracción. Asimismo, se registra una señal en torno a los 2900 cm⁻¹ asociada a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C–H alifáticos, comúnmente presentes en las cadenas hidrocarbonadas de polisacáridos. Las bandas observadas en la región de 1735 cm⁻¹ corresponden al grupo carbonilo (C=O) de los ésteres, atribuibles a residuos de hemicelulosa y componentes de la matriz PLA; dicha señal disminuye en intensidad tras el tratamiento, lo que indica una remoción efectiva de la hemicelulosa. En la región de 1600 a 1510 cm⁻¹ se evidencia la presencia de anillos aromáticos derivados de la lignina, cuya intensidad disminuye notablemente después del tratamiento, confirmando la depuración parcial de esta fracción. Las bandas alrededor de 1235 cm⁻¹ y 1030 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de



Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

estiramiento C–O–C y C–O, propias del esqueleto polisacárido de la celulosa. En las fibras tratadas, estas bandas se vuelven más definidas y desplazadas levemente, lo que indica una organización estructural más definida y un incremento en la cristalinidad. Finalmente, la comparación entre el espectro de los biocompuestos y los componentes individuales sugiere una interacción física sin formación de nuevos enlaces químicos, evidenciada por el mantenimiento de las bandas principales, aunque con ligeras variaciones en intensidad y desplazamiento, atribuibles a interacciones por puentes de hidrógeno entre las fases.

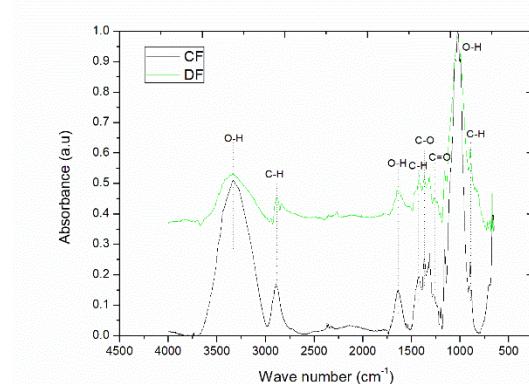


Figura 2. Espectros FTIR de DF y CF obtenidos de *Elaeis Guineensis Jacq.*

Análisis Termogravimétrico (TGA)

La Figura 3 muestra el termograma de TGA de las fibras desfibradas (DF) (Figure 3a) y de las fibras de celulosa (CF) (Figure 3b) obtenidas de *Elaeis Guineensis Jacq*. En la Figura 3a, se puede observar que, para las DF, se exhiben tres principales zonas para la pérdida de masa. La primera sección se encuentra entre los 30 °C 100 °C, lo cual se atribuye a la pérdida por evaporación de agua, y que es aproximadamente un 7 %. Después, el material permanece térmicamente estable hasta los 250 °C con una pérdida mínima de masa del 3 %. La segunda pérdida de masa fue observada entre los 260 °C y los 400 °C y dentro del cual se pierde una cantidad de masa de aproximadamente un 55 %. En este intervalo, se pueden observar dos picos importantes en la primera derivada (DTG), el primero, alrededor de los 300 °C, el primer pico pudiera ser atribuido a la descomposición de hemicelulosa y un poco de lignina. El Segundo pico, pudiera ser atribuido a la descomposición de la celulosa y la lignina remanente. La pirolisis se encuentra después de los 400 °C (degradación final), correspondiente a la pérdida de residuos con una pérdida de masa de un 10 % aproximadamente. Este comportamiento es similar al reportado por otros autores (González-Navarro et al., 2014).

En la Figura 3b, se puede observar el termograma para las fibras de celulosa (CF), y en la cual se pueden observar tres secciones principales. La pérdida de masa inicial entre los 30-100 °C asociada a la evaporación de agua presente en la celulosa y que se aproximadamente un 7 %. Después, el material se reporta térmicamente estable hasta aproximadamente los 240 °C y con una pérdida mínima de aproximadamente el 3 %. La siguiente sección de pérdida de masa, es la que se muestra entre 250 °C y 400 °C, mostrando un importante pico en la derivada (DTG) alrededor de 320 °C, y que se puede atribuir a la descomposición de celulosa, con una pérdida aproximada de 53 %. La pirolisis se encuentra después de los 400 °C (degradación final), correspondiente a la pérdida de residuos con una pérdida de masa de un 10 % aproximadamente. De acuerdo al análisis de TGA y

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibra de *Elaeis guineensis*

DTG, se pudiera inferir que la estabilidad térmica es superior a otra como el sisal (Ahmad & Luyt, 2012), banana (Bolio-López et al., 2011), y celulosa comercial (Yang et al., 2007).

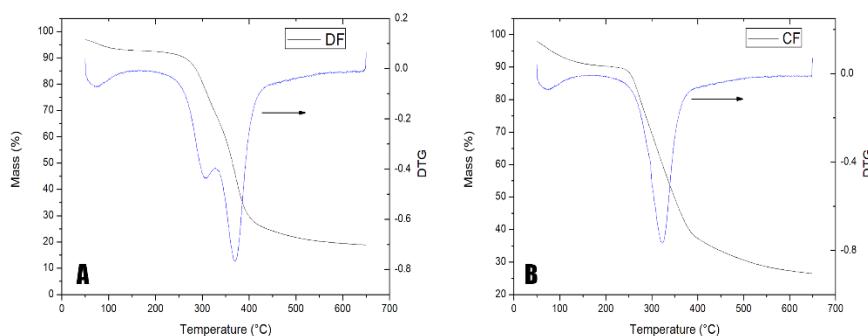


Figura 3. Resultados TGA de la descomposición térmica y su derivada (DTG) de a). DF y b) CF de *Elaeis Guineensis* Jacq.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La Figura 4 muestra el resultado del análisis de las pruebas de DSC que se les realizaron a los materiales compuestos de fibra de celulosa (CF) obtenidas de *Elaeis Guineensis* Jacq. y PLA. En la Figura 4, es posible observar un comportamiento similar para los cuatro termogramas, en los valores observados para temperatura de transición vítrea (T_g), temperatura de cristalización (T_c) y temperatura de fusión (T_m) para los diferentes materiales; todas las muestras presentaron temperaturas similares, con ligeros corrimientos a temperaturas menores conforme el contenido de CF es incrementado. Para el caso de las temperaturas reportadas en la Figura 4 para el PLA puro, se muestran para la T_g un valor de 61 °C, T_c con un valor de 103 °C y en cuanto la T_m , un doble pico con valores de 145° C y 154 °C, mostrando comparaciones similares a los reportados por otros autores como Choksi y Desai (2017) y Nghiem et al. (2019). En el caso de los compuestos PLA/CF, como se mencionó anteriormente, la Figura 4 muestra que, a medida que aumenta el contenido de CF, la temperatura de transición vítrea (T_g) presenta ligeras disminuciones, lo cual podría atribuirse a que las fibras actúan como agente plastificante para la matriz (Mofokeng et al., 2012). En cuanto a la T_c , de igual manera se observa una disminución de los valores conforme aumenta el contenido del refuerzo, lo cual se puede atribuir a que el relleno pudiera actuar como un agente de nucleación que promovió la cristalización del PLA en los compuestos (Mofokeng et al., 2012). Para la T_m , la aparición del doble pico pudiera atribuirse a la velocidad de enfriamiento del material (Shi et al., 2010), debido a que pudieron aparecer pequeños cristales imperfectos formados durante el proceso de enfriamiento, y por lo tanto, la recristalización pudiera ocurrir en el proceso de fundición (Lv et al., 2019). Para el caso del cambio en la intensidad de los picos, conforme el contenido de fibra es incrementado, esto pudiera ser indicación que la presencia de la fibra pudiera cambiar de alguna manera la morfología de las fracciones amorfas y cristalinas del polímero durante el proceso de enfriamiento (Mofokeng et al., 2012).

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

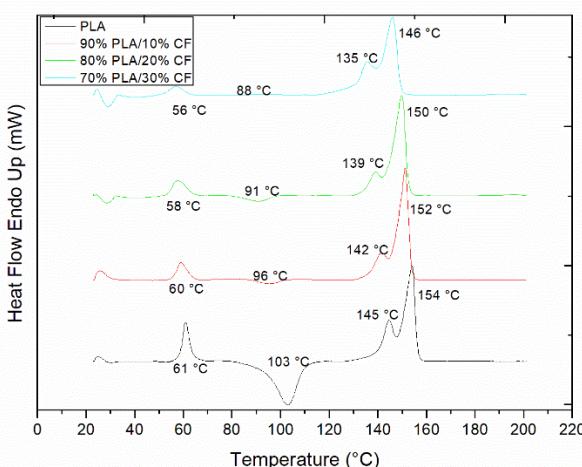


Figura 4. La Figura 4 muestra los resultados del análisis DSC del material compuesto PLA y CF de *Elaeis Guineensis Jacq.* con diferentes porcentajes.

Propiedades Mecánicas

En la figura 5 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de los materiales biocompuestos elaborados con las distintas concentraciones de fibra. La figura 5a se presenta el resultado de los valores de resistencia a la tensión para el PLA sin fibra y de las distintas concentraciones de fibra incorporadas en la matriz de PLA. Se puede observar que para el PLA sin fibra tuvo un valor de 58 MPa similar al valor reportado por otros autores (Graupner & Müssig, 2017). Asimismo, se observó que en la medida que el contenido de CF incrementó, el valor de la resistencia a la tensión disminuyó; por otro lado, no se observó diferencia significativa en los valores de resistencia entre concentraciones de fibra del 10 % y 20 %. Sin embargo, cuando el contenido de CF se incrementó al 30 %, la resistencia a la tensión disminuyó drásticamente, lo cual se puede deber a la pobre adherencia interfacial de los materiales debido a la incompatibilidad natural y disimilitud química de los materiales constituyentes (Spiridon et al., 2016).

En la Figura 5b se muestran los resultados del módulo de elasticidad de los especímenes elaborados con PLA sin fibra y del material biocompuesto elaborado con las distintas concentraciones de fibra en la matriz de PLA. Se observa que el valor del módulo de elasticidad para el PLA puro es de 3500 MPa, lo cual coincide con lo reportado por otros autores (Gupta & Srivastava, 2016; Piekarska et al., 2016). Asimismo, se observa que en la medida que el contenido de fibra incrementó el valor del módulo de elasticidad incrementó (Piekarska et al., 2016). Al incorporar en 10% el contenido de fibra en la matriz de PLA el valor del módulo de elasticidad aumentó un 10 %. Además, este incremento en el módulo cuando se añaden las FC en el material compuesto, pudiera sugerir que la presencia de las FC promueve las restricciones de las cadenas de PLA, permitiendo un incremento en el módulo de elasticidad (Mokhena et al., 2018; Tingaut et al., 2010).

Los resultados destacan el papel clave del tratamiento químico aplicado a las fibras del raquis de *Elaeis guineensis Jacq.* en las propiedades estructurales y funcionales de los biocompuestos. La eliminación de lignina y hemicelulosa, evidenciada por la disminución de bandas características en FTIR y el aumento de señales C–O y C–O–C, expone más grupos hidroxilo, mejorando la interacción

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

con la matriz de PLA mediante enlaces de hidrógeno. Esto se asocia con una mayor cristalinidad de las fibras tratadas, reflejada en un mejor desempeño térmico y una mayor temperatura de degradación (TGA). El incremento del módulo de elasticidad en los compuestos CF/PLA se vincula a la rigidez aportada por fibras más puras. Sin embargo, la disminución de la resistencia a la tracción a altos contenidos de refuerzo indica que la compatibilidad interfacial sigue siendo limitada. Este desafío podría abordarse con tratamientos adicionales como la silanización o el uso de compatibilizantes. En conjunto, los hallazgos subrayan la importancia del pretratamiento de fibras para obtener biocompuestos con propiedades mejoradas.

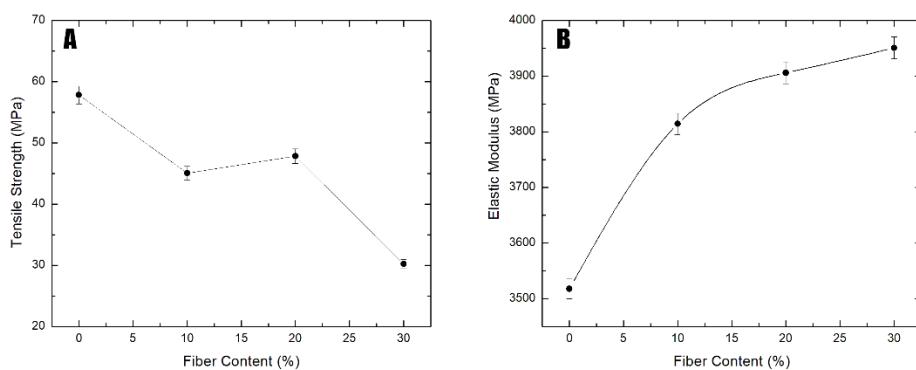


Figura 5. Resultados de las propiedades mecánicas de los materiales Biocompuestos. A: Resistencia a la Tensión; B: Módulo de elasticidad.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Este estudio demostró la viabilidad de incorporar fibras del raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), en forma de fibra corta y whiskers de celulosa, como refuerzos en matrices de PLA para elaborar biocompuestos sostenibles. Las fibras tratadas químicamente mostraron mayor pureza y cristalinidad (FTIR), y buena estabilidad térmica (TGA, DSC). Se incrementó el módulo de elasticidad en un 10 % con 10 % de refuerzo, aunque a mayores concentraciones disminuyó la resistencia a la tracción por baja compatibilidad interfacial. Estos hallazgos confirman la viabilidad de valorizar residuos agroindustriales en materiales biodegradables funcionales.

REFERENCIAS

- Ahmad, E., & Luyt, A. (2012). Morphology, thermal, and dynamic mechanical properties of poly (lactic acid)/sisal whisker nanocomposites. *Polymer Composites*, 33(6), 1025-1032.
- Ajayi, S. M., Olusanya, S. O., Didunyemi, A. E., Abimbade, S. F., Olumayede, E. G., & Akintayo, C. O. (2025). Physicochemical properties of oil palm biomass waste fibres and its cellulose for engineering applications: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(5), 6545-6555.
- Babu, N. S. A. (2024). *Investigation of chemicomechanical properties of polyamide 12 composite reinforced with fillers from agriculture biowaste as a potential dental post*

Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

- Bharat, N., Kumar, V., Veeman, D., & Vellaisamy, M. (2025). Enhancing mechanical properties of 3D-printed PLA/wood composites: a metaheuristic and statistical perspective. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(3), 1-22.
- Bolio-López, G., Valadez-González, A., Veleva, L., & Andreeva, A. (2011). Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: Obtención y caracterización. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2), 291-299.
- Choksi, N., & Desai, H. (2017). Synthesis of biodegradable polylactic acid polymer by using lactic acid monomer. *Int. J. Appl. Chem*, 13(2), 377-384.
- Dhakal, H. N., Khan, S. H., Alnaser, I. A., Karim, M. R., Saifullah, A., & Zhang, Z. (2024). Potential of date palm fibers (DPFs) as a sustainable reinforcement for bio-composites and its property enhancement for key applications: a review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(10), 2400081.
- González-Navarro, M. F., Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J. C. (2014). Preparation and characterization of activated carbon for hydrogen storage from waste African oil-palm by microwave-induced LiOH basic activation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 82-86.
- Graupner, N., & Müssig, J. (2017). Cellulose Fiber-Reinforced PLA versus PP. *International Journal of Polymer Science*, 2017(1), 6059183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2017/6059183>
- Gupta, M. K., & Srivastava, R. K. (2016). Mechanical Properties of Hybrid Fibers-Reinforced Polymer Composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(6), 626-642. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1098694>
- Jayanthi, B., Vinoth, S., Hariharan, M., Raja, R. K., Kamaraj, C., & Narayanan, M. (2024). Valorization of agro-industry wastes for nanocellulose fabrication and its multifunctional applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57, 103124.
- Leite-Barbosa, O., Pinto, C. C. d. O., Leite-da-Silva, J. M., De Aguiar, E. M. M. M., & Veiga-Junior, V. F. (2024). Polymer Composites Reinforced with Residues from Amazonian Agro-Extractivism and Timber Industries: A Sustainable Approach to Enhancing Material Properties and Promoting Bioeconomy. *Polymers*, 16(23), 3282.
- Lv, R., He, Y., Wang, J., Wang, J., Hu, J., Zhang, J., & Hu, W. (2019). Flash DSC study on the annealing behaviors of poly (l-lactide acid) crystallized in the low temperature region. *Polymer*, 174, 123-129.
- Mofokeng, J. P., Luyt, A., Tábi, T., & Kovács, J. (2012). Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25(8), 927-948.
- Mokhena, T. C., Sefadi, J. S., Sadiku, E. R., John, M. J., Mochane, M. J., & Mtibe, A. (2018). Thermoplastic Processing of PLA/Cellulose Nanomaterials Composites. *Polymers*, 10(12), 1363. <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/12/1363>
- Nghiem, P. A. P., Alesini, D., Aschikhin, A., Assmann, R., Audet, T., Beck, A.,...Cianchi, A. (2019). Eupraxia, a step toward a plasma-wakefield based accelerator with high beam quality. *Journal of Physics: Conference Series*.



Optimización y caracterización de biocompuestos de PLA con
fibras de *Elaeis guineensis*

Piekarska, K., Sowinski, P., Piorkowska, E., Haque, M. M. U., & Pracella, M. (2016). Structure and properties of hybrid PLA nanocomposites with inorganic nanofillers and cellulose fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 34-41.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.019>

Shi, Q., Mou, H., Gao, L., Yang, J., & Guo, W. (2010). Double-melting behavior of bamboo fiber/talc/poly (lactic acid) composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 567-575.

Spiridon, I., Darie, R. N., & Kangas, H. (2016). Influence of fiber modifications on PLA/fiber composites. Behavior to accelerated weathering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 19-27.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.032>

TG, Y. G., Ballupete Nagaraju, S., Puttegowda, M., Verma, A., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2023). Biopolymer-based composites: an eco-friendly alternative from agricultural waste biomass. *Journal of Composites Science*, 7(6), 242.

Tingaut, P., Zimmermann, T., & Lopez-Suevos, F. (2010). Synthesis and Characterization of Bionanocomposites with Tunable Properties from Poly(lactic acid) and Acetylated Microfibrillated Cellulose. *Biomacromolecules*, 11(2), 454-464. <https://doi.org/10.1021/bm901186u>

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.

Yeo, J. C. C., Muiruri, J. K., Lee, P. S. K., Vijayakumar, R., Lin, T. T., Zhang, X.,...Li, Z. (2024). Sustainable poly (lactic acid) transformation: Leveraging agri-food waste—compatibilization strategies nexus for enhanced properties. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 7(6), 190.

