

COMPOSITOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES TRATADAS CON PLASMA. UNA REVISIÓN

POLYMERIC COMPOSITES REINFORCED WITH PLASMA-TREATED NATURAL FIBERS: A REVIEW

CRUZ DE LA FUENTE, Víctor Hugo¹

NARRO CÉSPEDES, Rosa Idalia¹

FARÍAS CEPEDA, Lorena¹

SORIA ARGÜELLO, Gustavo²

REYES ACOSTA, Yadira Karina³

CASTAÑEDA FACIO, Adalí Oliva¹

RESUMEN

Se realizó una revisión bibliográfica de forma sistemática de estudios que emplean plasma frío para mejorar la compatibilidad interfacial en compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales (FN). Las FN más estudiadas fueron coco, madera y sisal, combinadas con matrices poliméricas como polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP) y resinas epóxicas. El plasma de oxígeno resultó el tratamiento más común, seguido del de etileno y amonio. Los resultados indican que la funcionalización con plasma mejora significativamente las propiedades mecánicas de los compuestos, promoviendo una mejor adhesión y dispersión entre la fibra y la matriz polimérica.

Palabras clave: compósitos; fibras naturales; plasma; propiedades físico-mecánicas.

1. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.
2. SECIHTI-Centro de Investigación en Química Aplicada, Saltillo, Coahuila, México.
3. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

ABSTRACT

A systematic literature review was conducted on studies that use cold plasma to improve interfacial compatibility in polymer composites reinforced with natural fibers (NF). The most studied NFs were coconut, wood, and sisal, combined with polymer matrices such as low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP), and epoxy resins. Oxygen plasma emerged as the most common treatment, followed by ethylene and ammonium plasmas. The results indicate that plasma functionalization significantly improves the mechanical properties of the

Correspondencia
rinarro@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3559-1520>
Fecha de recepción
28 de enero de 2025.
Fecha de aceptación
28 de noviembre de 2025.

composites, promoting better adhesion and dispersion between the fiber and the polymer matrix.

Keywords: *composites; natural fibers; plasma; physicochemical properties.*

INTRODUCCIÓN

La llegada de los plásticos a la humanidad revolucionó la industria, el comercio, la medicina y mejoró la calidad de vida de las personas, ocasionando todo un mercado en torno a los plásticos, al generar innovación y desarrollo. En consecuencia, esta producción en gran escala, ha provocado un incremento desmedido en la cantidad de residuos plásticos, llegando esto a ser un problema global. Anualmente se producen 380 millones de toneladas de plástico (Buteler Micaela, 2019) de los cuales es mínimo lo que se llega a reciclar. Por lo que, con base en las tendencias políticas y sociales, así como los 17 objetivos que deben ser cumplidos para el 2030 del desarrollo sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), (Organización de las Naciones Unidas 2015), estas dan la pauta para la búsqueda de soluciones y alternativas que ayuden a atenuar las consecuencias de la contaminación por plásticos y al menor impacto ambiental, con el fin de que los materiales con potencial comercial sean más amigables con el medio ambiente (Luna y col., 2022). Es posible el logro de estos objetivos, mediante mejoramiento de procesos industriales, síntesis química más sustentable y compósitos formulados a partir de refuerzos extraídos de fuentes naturales en forma de fibra para la obtención de compósitos poliméricos reforzados con FN.

Estos refuerzos naturales pueden ser tratados químicamente, sin embargo, también pueden ser modificados superficialmente por medio de la tecnología de plasma. Esta tecnología es limpia, económica y no deja residuos como los dejados en los tratamientos químicos. La modificación superficial por plasma es considerada una tecnología ambientalmente benigna, que puede mejorar las propiedades de estos compósitos, para ser utilizados en la industria automotriz, de la construcción y múltiples aplicaciones más (Alonso y col., 2017).

Los compósitos poliméricos reforzados con materiales biodegradables, son materiales que están compuestos por una matriz polimérica y una fase de

refuerzo, este refuerzo pueden ser fibras naturales de diferentes especies como lo es el sisal, yute, agave, cáñamo, algodón, fibra de coco, etc. (Renato y col., 2019). La finalidad de utilizar estas fibras, es mejorar el módulo de Young, aumentar la biodegradabilidad para disminuir la contaminación, reducir costos y disminuir el peso del producto obtenido (Posada y col., 2020). Los compósitos que contienen fibras naturales en su composición son alternativas viables para su explotación en el mercado. Sin embargo, las fibras al ser mezclados con matrices poliméricas, presentan una problemática principal, que es la baja compatibilidad entre ambos. Las fibras tienen una afinidad hidrofílica, debido, a los grupos hidroxilo que se encuentran en la superficie, mayoritariamente presentes en la celulosa y lignina, mientras los polímeros, principalmente polietileno y polipropileno presentan un carácter hidrófobo, debido a esto es lo que genera una pobre interacción entre ellos (Restrepo, 2016; Rozman, 2000). Sin embargo, la tecnología del plasma es una herramienta útil, que puede ser utilizada para mejorar la interacción interfacial entre la matriz y el material de refuerzo, generando sobre la superficie de la fibra grupos funcionales semejantes al polímero con el que se va a mezclar.

El propósito de esta investigación es brindar un análisis del estado del arte de las investigaciones que abordan información, acerca de compósitos poliméricos reforzados con fibras naturales y los resultados que se han obtenido con la utilización de la tecnología del plasma.

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos científicos en bases de datos como Google Académico, Scopus y ScienceDirect del 2019 al 2024. La finalidad fue obtener información relevante y actualizada acerca de las fibras naturales, su composición, y el efecto que tiene la tecnología del plasma sobre las mismas.

COMPUESTOS POLIMÉRICOS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Los compósitos en general se definen como materiales que están hechos de dos o más fases distintas, que comprenden una matriz y una fase o fases que



pueden actuar como refuerzos, las cuales están separadas por una interfase reconocible (Verdejo y col., 2021). La importancia de los compósitos y por lo que es deseable su obtención, es que muestran características estructurales y funcionales que no pueden ser alcanzadas por un polímero específico por sí solo (Ageyeva y col., 2018). La fase de refuerzo (fibras), debe tener como característica ser más fuerte y rígida que el de la matriz mientras que la función de la matriz polimérica, es mantener la estructura y forma, además de proteger el refuerzo del ataque ambiental (Ageyeva y col., 2018).

COMPOSICION QUÍMICA Y ESTRUCTURAL DE LAS FN

Las fibras naturales están compuestas en su mayoría por celulosa, lignina y hemicelulosa, de entre ellas, la celulosa es el biopolímero natural más abundante, que ha despertado gran interés por el potencial que presenta, debido a sus propiedades mecánicas, sus grupos reactivos y su biodegradabilidad (Wei y col., 2015). Trivedi y col. en el 2015 mencionan las características químicas de la celulosa y su composición:

La celulosa presenta una estructura compleja con dos niveles de organización: El nivel supramolecular compuesto por regiones cristalinas y amorfas y el nivel molecular que consiste en unidades de D-anhidroglucopiranososa (AGU) dispuestas en la configuración de silla, unidas por enlaces β -1,4-glicosídicos que dan como resultado un giro alternativo del eje de la cadena de celulosa por 180° . Cada AGU repetida posee tres grupos hidroxilo, un grupo primario en C6 y dos grupos secundarios en C2 y C3, los cuales pueden formar enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares, dando lugar a la formación de estructuras cristalinas tridimensionales altamente ordenadas (Poonan Trivedi y col., 2019). En la Figura 1 se observa la estructura de la celulosa.

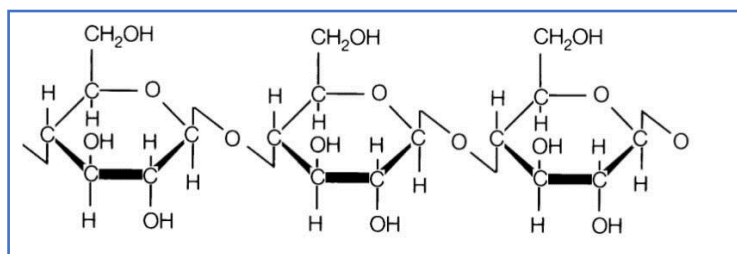


Figura 1. Estructura de la celulosa (Molina, 2020).

La lignina es un heteropolímero presente en las estructuras vasculares de las plantas (Lucas y col., 2013), que añade rigidez estructural además de resistencia a la tensión y presión hídrica (Renault y col., 2019); por otra parte, la celulosa y la lignina en conjunto son los principales componentes estructurales de los materiales de origen vegetal utilizados en la industria forestal, de los cuales se obtienen productos renovables que sirven como materia prima (De Souza y col., 2020; Yu y Kim, 2020). El porcentaje de lignina oscila entre 15–25 % en las plantas vasculares. La lignina es considerada un recurso renovable asequible y con potencial de uso industrial; su producción anual se estima aproximadamente en $5\text{--}36 \times 10^8$ toneladas anuales (Chávez, 2013). En la Figura 2 se observa la estructura de la lignina.

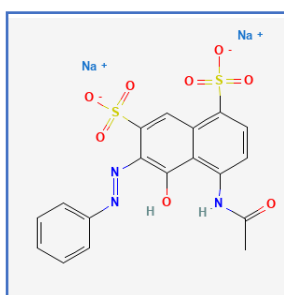


Figura 2. Estructura de la lignina (Centro Nacional de Información Biotecnológica, 2024)

La hemicelulosa es un heteropolímero compuesto por diferentes unidades de azúcares, como glucanos, mananos y xilanos. Tiene una estructura ramificada y funciona como agente de estabilización, presente en las paredes celulares de las plantas (Brunner, 2014).

En la Figura 3 se observa la estructura interna de una fibra natural, donde S3 es la pared terciaria, S2 la pared secundaria, S1 la pared primaria y P la pared exterior. La pared primaria (P) contiene una red organizada, en forma suelta y aleatoria, de microfibrillas de celulosa embebidas en una matriz de hemicelulosas parcialmente orientadas.

Bajo la pared primaria se encuentra la pared secundaria, que constituye casi la totalidad de la pared celular. Esta pared está dividida en tres capas denominadas S1, S2 y S3. La capa exterior de la pared secundaria (S1) presenta un patrón entrecruzado de microfibrillas. La capa S2 ocupa la mayor parte del volumen de la pared celular; en esta parte, las microfibrillas están orientadas de forma casi paralela al eje de la fibra (Turrado y col., 2008).

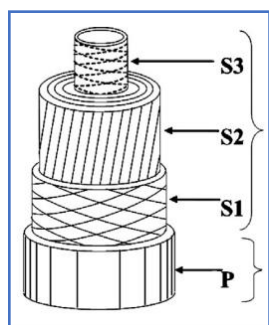


Figura 3. Estructura física de las fibras bio-basadas. (N. Martín y col., 2013)

En la Tabla 1 se muestra el contenido de celulosa, lignina, hemicelulosa y ceniza presente en las fibras naturales mencionadas en los composites en esta investigación documental.

Tabla 1. composición química de las fibras más utilizadas en composites poliméricos

%	Lino Lazić y col. (2017)	Coco Wu y col. (2019)	Yute Jahan y col. (2010)	Madera (<i>Pinus radiata</i>) Gómez y col. (2012)	Agave Satyanarayana y col. (2013)
Celulosa	64.1-76	44	65	37.88	73.60
Lignina	2-5	33	12.7	33.72	21.10
Hemicelulosa	11-20.6	12	15.8	23.62	-
Ceniza	-	2	2.1	-	5.30

EFFECTO DEL PLASMA EN COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

A continuación, se presentan diversas investigaciones que emplean el tratamiento con plasma como agente de mejora en las propiedades de distintos composites poliméricos, con diferentes matrices y proporciones de carga orgánica. Por ejemplo, en la investigación realizada por Ravishankar y col. (2024), se prepararon compuestos laminados a base de termoplásticos reforzados con yute o lino. Se utilizó una matriz de polipropileno (PP) con 45 % de fibra de lino o de yute en forma de tela. También se fabricaron compuestos en forma de sándwich, conformados por capas de fibra de lino/PP/PET y de fibra de yute/PP/PET, donde el PET era espuma reciclada. Las fibras fueron modificadas mediante plasma de oxígeno, helio y aire (8 % / 1.5 % / 90.5 %), aplicado a baja presión, con 1000 W de potencia y a una velocidad constante de 1 m/min.

Los resultados mostraron que los laminados de lino/PP superaron en propiedades mecánicas a los de yute/PP, con mejor desempeño en pruebas de tracción, flexión e impacto. Un hallazgo significativo fue el efecto positivo

del tratamiento con plasma en los laminados de lino, que condujo a un aumento de 8.6 % en la resistencia a la flexión, alcanzando un valor de 54.09 MPa, en comparación con el laminado de lino/PP sin tratamiento. Esto resalta la eficacia del plasma para mejorar propiedades mecánicas específicas. Además, se observó que los laminados de lino/PP con núcleo de espuma PET reciclada exhibieron la mayor resistencia mecánica y mejores propiedades de flexión en comparación con los laminados de yute y PP. Por otra parte, Moadab y col. (2023) realizaron ensayos utilizando PP como matriz y fibra de madera como refuerzo, la cual fue tratada con plasma frío atmosférico durante 0, 60, 120 y 180 segundos, con una potencia de 20 kV. Los mejores resultados se obtuvieron con 180 segundos de tratamiento, en los que el módulo de almacenamiento mejoró de 500 MPa a 800 MPa gracias al efecto del plasma.

Asimismo, Putra y col. (2020) utilizaron la tecnología de plasma de microondas para modificar fibra de coco, empleando como fase continua una resina epóxica. La modificación se concretó gracias a la acción del plasma sobre una solución acuosa de bicarbonato de sodio a 8, 10 y 12 % en peso, con una potencia de 600 W, presión de 20 kPa y tiempos de 3, 4, 5 y 6 minutos. Con la fibra expuesta durante cinco minutos al tratamiento con plasma, los resultados mostraron un aumento en la resistencia al deslizamiento interfacial de 4.23 a 4.75 MPa, así como una disminución de la fuerza de tracción de las fibras.

En otro trabajo, reportado por Corral y col. (2021), se formuló espuma de polietileno de baja densidad con acetato de vinilo-etileno y fibras de agave tratadas con plasma de etileno a 13.56 MHz de frecuencia, 40 W de potencia y 2.9 Pa de presión durante 60 minutos. Las mejores propiedades mecánicas se lograron mediante la incorporación del 12 % en peso de fibras de agave. Con este contenido de fibra, el módulo de compresión mejoró un 7 % al adicionar fibras vírgenes y un 30 % al utilizar fibras tratadas con plasma.

De modo similar, Farías y col. (2017) evaluaron la resistencia a la tracción de un compuesto con una matriz de polietileno (PE) y 30 % de fibra de coco modificada con plasma. Los gases elegidos para el tratamiento fueron oxígeno puro y aire; ambos provocaron grabado superficial. Las presiones de gas utilizadas en los tratamientos de plasma fueron de 10 Pa (1.0×10^{-1} mbar) para el aire y 5 Pa (5.0×10^{-2} mbar) para el oxígeno. Estas presiones se seleccionaron para lograr una mayor intensidad del plasma bajo estas condiciones, medida con un espectrómetro óptico. La rotación del soporte de

la muestra se mantuvo a 60 RPM mediante un motor interno. La potencia del reactor de plasma fue suministrada por un generador RF de 13.56 MHz, y el circuito de adaptación de impedancia fue construido internamente con capacitores variables. El efecto del tratamiento por plasma en la fibra de coco mejoró la resistencia a la tracción en 300 %, usando como precursor el gas oxígeno durante 7.2 minutos a 80 W de potencia, siendo éste el más eficiente en comparación con el plasma de aire.

Del mismo modo, Muralidhar y col. (2020) emplearon una matriz de PP y fibra de sisal, donde el porcentaje óptimo de fibra fue de 25 % en peso del compósito. El tratamiento con plasma atmosférico se realizó utilizando los siguientes gases: oxígeno de alta pureza, argón y amoníaco. Las fibras de sisal preparadas se organizaron en un soporte rectangular para muestras (51 × 55 cm) y se colocaron entre dos electrodos a 60 W de potencia, presión de 9×10^{-2} kPa y un tiempo de diez minutos. Los resultados confirmaron un incremento en la resistencia a la flexión. Los compósitos con fibra sin tratar obtuvieron un valor de 4.71 MPa, mientras que los compósitos con fibra tratada alcanzaron 7.17 MPa, obteniendo así una ganancia significativa en dicha propiedad.

En otra investigación, Sari y col. (2021) utilizaron una matriz de PE modificada con plasma de microondas, usando oxígeno a una presión de 70–100 Pa, a temperatura ambiente y con una duración de 60 y 600 segundos, y como fase dispersa la fibra de coco blanqueada y sin blanquear a 5 % en peso. Los resultados obtenidos mostraron un incremento en la resistencia a la tracción de 16 MPa a 19 MPa.

Por otra parte, Macedo y col. (2019) obtuvieron un composito a base de PE y fibra de kapok modificada con plasma frío atmosférico. Ellos utilizaron un voltaje de 400–500 V y un caudal de oxígeno de 10 cm³ L/min a una presión de 1.5 mbar, encontrando que la resistencia a la tracción se mantuvo estable, de 21.1 MPa antes del tratamiento a 20.5 MPa postratamiento.

En los diversos estudios evaluados se encontró que las fibras naturales por sí solas presentan poca afinidad con las matrices poliméricas; sin embargo, después de la funcionalización con la tecnología del plasma, en general se obtienen ganancias en la resistencia de estos compositos debido a la afinidad lograda por el plasma entre la matriz y la fibra. Por otra parte, las fibras naturales (FN) son particularmente valoradas por su uso como refuerzo en matrices poliméricas, ya que son biodegradables y disminuyen el peso del producto obtenido, mientras que el plasma brinda una opción ecológica

viable para mejorar aún más las propiedades mecánicas de estos composites y crear nuevos materiales poliméricos (Gupta y col., 2021).

En la Tabla 2 se observa el análisis de las diversas investigaciones abordadas en esta revisión, donde se advierte que se utilizaron plasmas a diferentes frecuencias, como: a) el plasma de RF, que opera a una frecuencia de aproximadamente 13.56 MHz, y b) el plasma de microondas, que opera a una frecuencia de alrededor de 2.45 GHz. También se utilizó el plasma atmosférico creado al ionizar un gas como el aire, el cual, en vez de utilizar radiofrecuencia, se produce a través de una descarga eléctrica de alta tensión. Se encontró que los plasmas fríos más utilizados en estas investigaciones fueron los de radiofrecuencia a baja presión y los atmosféricos. También se puede advertir que los polímeros más empleados en la formulación de los composites son el PP y el PE, siendo el PE el más comúnmente utilizado. Las fibras utilizadas van desde sisal, fibra de coco, fibra de madera, agave, lino y kapok, siendo la más investigada la fibra de coco. Por otro lado, se observa que el gas precursor más empleado para la obtención del plasma fue el oxígeno, seguido del plasma de aire, el plasma de etileno y el plasma de amonio. El objetivo principal de estas investigaciones fue comprobar el beneficio de la modificación superficial por plasma, se advierte en la Tabla 2 que, independientemente del tipo de precursor de plasma y del composite obtenido, cuando se utiliza plasma se produce un incremento general en las propiedades fisicomecánicas de estos materiales. El mayor o menor aumento en las propiedades está relacionado y depende de variables como la concentración de la fibra, el tipo de fibra utilizada, las condiciones de la modificación y el tipo de gas precursor.

Gracias a la manipulación de estas variables, por ejemplo, en la resistencia a la flexión se pudo lograr hasta 45 % de incremento; en el módulo de almacenamiento, de 500 MPa se consiguió obtener hasta 800 MPa; se logró hasta 130 % de incremento en la resistencia a la compresión; mientras que en la resistencia a la tracción se alcanzó un incremento de hasta 375 % en los diferentes composites y con las diferentes variables utilizadas.

Estos incrementos en las propiedades son atribuidos a dos factores importantes provocados al modificar la superficie de las fibras por plasma:

1. El plasma provoca que las fibras sean más compatibles con la matriz. Esto se debe a que la tecnología del plasma puede manipular las propiedades superficiales de los materiales, haciéndolos más hidrofílicos o hidrofóbicos, de acuerdo con las propiedades

superficiales que presente la matriz con la que se vaya a mezclar la fibra, con el fin de provocar una mayor interacción interfacial.

- Las fibras, al ser más compatibles con la matriz, tienden a dispersarse mejor y no aglomerarse dentro de ella, logrando que el material se refuerce más homogéneamente.

Estos dos factores —la mayor interacción interfacial, que logra una adhesión más efectiva con la matriz, y la mejor dispersión de la fibra dentro de la matriz— son los responsables del notable aumento de las propiedades mecánicas. Lo cual avala la premisa de que el plasma puede mejorar significativamente las propiedades de estos materiales compuestos.

Tabla 2. Análisis de compositos poliméricos con fibras naturales que emplearon plasma como agente de mejora.

Autor	Año	Tipo de plasma empleado	Metodología	Componentes del composito	Resultados más relevantes
Ravi-shankar	2024	Plasma de oxígeno/helio/aire	Matriz de PP reforzado con malla de lino modificada con plasma de oxígeno atmosférico a una potencia de 1000 W, velocidad de modificación 1 m x minuto	Polipropileno y fibra de lino 45%	Aumento del 45 % en resistencia a la flexión de 49.39 MPa a 54.09 MPa.
Moadab	2023	Plasma de aire	Matriz de PP, fibra de madera tratada usando plasma frío atmosférico 0, 60, 120 y 180 segundos, potencia de 20 KV	Polipropileno y fibra de madera	La exposición a 180 segundos mejoró el módulo de almacenamiento de 500 MPa a 800 MPa posterior al tratamiento con plasma.
Corral	2021	Plasma de etileno con radiofrecuencia	Matriz de espuma de PE con fibra de agave utilizando plasma de etileno de radiofrecuencia a 60 W potencia por 60 min y presión de 2.9 Pa	Espuma de PE y fibra de agave	La carga orgánica óptima es del 12 % en peso. Aumento a la resistencia a la compresión de 2.7 KJ/m ³ a 3.5 KJ/m ³
Putra	2020	Plasma de microondas	Matriz de resina epóxica con fibra de coco modificada con plasma sobre solución acuosa de bicarbonato de sodio al 8,10 y 12 % en peso, a potencia de 600 W, presión de 20 kPa y tiempos de 3, 4, 5 y 6 min.	Resina epóxica y fibra de coco	Aumento a la resistencia al deslizamiento interfacial de 4.23 MPa a 4.75 MPa
Farias	2017	Oxígeno puro y aire	Matriz de PE y fibra de coco con plasma de radiofrecuencia por 7.2 minutos a 80 W de potencia a 10 Pa para aire y 5 Pa para oxígeno	PE y 30% de fibra de coco	Mejora del 300% en resistencia a la tracción usando oxígeno durante el tratamiento por plasma.
Murali-dhar	2020	Plasma con oxígeno, aire y amoniaco	Matriz de PP y fibra de sisal en concentración de 25% en peso modificada con plasma de amonio a 60 W de potencia a una presión de 9X10 ⁻² kPa por 10 minutos	PP y fibra de sisal	Aumento a la resistencia a la flexión de 4.71 MPa a 7.17 MPa
Sari	2019	Plasma de microondas con atmósfera de oxígeno	Matriz de LDPE modificado con plasma de microondas y refuerzo de fibra de coco utilizando 1 atm de oxígeno, presión de 70-100 Pa, tiempo 600 segundos y temperatura ambiente.	LDPE y fibra de coco	Aumento en la resistencia a la tracción de 16 MPa a 19 MPa.
Macedo	2019	Plasma de oxígeno	Matriz de PE y fibra de Kapok modificada con plasma de oxígeno, con un voltaje de 400-500 V, caudal de oxígeno de 10 cm ³ .min ⁻¹ y presión de 1.5 Mbar.	PE y fibra de Kapok	La resistencia a la tracción se mantuvo estable de 21.1 MPa antes del tratamiento a 20.5 MPa post tratamiento.

CONCLUSIONES

Los estudios revisados mostraron aumentos significativos de hasta 45 por ciento en resistencia a la flexión y módulos de almacenamiento que pasaron



de 500 a 800 MPa, que indican que el tratamiento con plasma es un método eficaz para mejorar las propiedades de los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales. Al modificar la superficie de las fibras se logra una adhesión más efectiva con la matriz, así como una mayor dispersión de las fibras dentro de esta matriz, promoviendo un material más homogéneo y una mayor interacción interfacial que provocan un notable incremento en las propiedades mecánicas. Aunado a lo anterior, estos composites son más livianos y más biodegradables, y debido a las regulaciones ambientales más exigentes, esto los hace materiales más atractivos para aplicaciones industriales, como la fabricación de paneles interiores de automóviles. Esta investigación muestra el creciente interés en la investigación sobre el uso de fibras naturales como refuerzo polimérico, así como en la implementación de tecnologías sostenibles para minimizar el impacto ambiental, como el uso de la tecnología de plasma. En conclusión, el tratamiento con plasma representa una solución efectiva para mejorar la adhesión entre las fibras naturales y las matrices poliméricas, facilitando así el desarrollo de materiales compuestos con propiedades superiores y un mayor potencial para aplicaciones industriales.

REFERENCIAS

- Pozo Morales, A. R. (2019). *Materiales compuestos de fibras naturales* [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/55053/1/ANGEL_RENATO_POZO_MORALES.pdf
- Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2019). Natural Fiber Reinforced Composites: History, Types and New Trends. En M. Jawaid, M. S. Salit, & M. R. Islam (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (pp. 155–178). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12903-3_9
- Brunner, G. (2014). Processing of biomass with hydrothermal and supercritical water. En G. Brunner (Ed.), *Hydrothermal and Supercritical Water Processes* (pp. 395–509). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59413-6.00008-X>
- Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos? *Desde la Patagonia. Difundiendo Saberes*, 16(28): 56–60. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/109678>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial.



Avances en Ciencias e Ingeniería, 4(4): 15–46. <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>

- De Souza, R. E., Gomes, F. J. B., Brito, E. O., Costa-Lelis, R. C., Ribas-Batalha, L. A., Almeida-Santos, F., & Longue-Junior, D. (2020). A review on lignin sources and uses. *Journal of Applied Biotechnology and Bioenergy*, 7: 100–105. <https://doi.org/10.15406/jabb.2020.07.00222>
- De Farias, J. G. G., Cavalcante, R. C., Canabarro, B. R., Viana, H. M., Scholz, S., & Simão, R. A. (2017). Surface lignin removal on coir fibers by plasma treatment for improved adhesion in thermoplastic starch composites. *Carbohydrate Polymers*, 165: 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.02.042>
- Kestur, G. S., Flores-Sahagun, T. H. S., dos Santos, L. P., dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45: 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>
- Gupta, U. S., Dhamarikar, M., Dharkar, A., Chaturvedi, S., Kumrawat, A., Giri, N., y Namdeo, R. (2021). Plasma modification of natural fiber: A review. *Materials Today: Proceedings*, 43: 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.973>
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., y Peña, J. D. (2012). Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Información Tecnológica*, 23(6): 73–86. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642012000600009>
- Jahan, M. S., Saeed, A., He, Z., y Ni, Y. (2010). Jute as raw material for the preparation of microcrystalline cellulose. *Cellulose*, 18(2): 451–459. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9481-z>
- Lazić, B. D., Pejić, B. M., Kramar, A. D., Vukčević, M. M., Mihajlović, K. R., Rusmirović, J. D., y Kostić, M. M. (2017). Influence of hemicelluloses and lignin content on structure and sorption properties of flax fibers (*Linum usitatissimum* L.). *Cellulose*, 25(1): 697–709. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1575-4>
- Lucas, W. J., Groover, A., Lichtenberger, R., Furuta, K., Yadav, S. R., Helariutta, Y., y Kachroo, P. (2013). The plant vascular system: evolution, development and functions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 55(4): 294–388. <https://doi.org/10.1111/jipb.12041>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., y Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2): e2722137. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Macedo, M. J., Silva, G. S., Feitor, M. C., Costa, T. H., Ito, E. N., y Melo, J. D. (2020). Surface modification of kapok fibers by cold plasma surface treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2): 2467–2476. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.077>
- Martin, N., Mouret, N., Davies, P., y Baley, C. (2013). Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene



composites. *Industrial Crops and Products*, 49: 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.012>

Molina, A., y Flórez-Castillo, J. M. (2020). Biopolímeros como sistemas de bioencapsulación. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19521.17767/1>

Muralidhar, B. A. (2020). Characterization of sisal/polypropylene composites treated with plasma. *Textile & Leather Review*, 3(4), 202–212. <https://doi.org/10.31881/TLR.2020.15>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Muralidhar, B. A. (2020). Characterization of sisal/polypropylene composites treated with plasma. *Textile & Leather Review*, 3(4): 202–212. <https://doi.org/10.31881/TLR.2020.15>

Putra, A. E. E., Renreng, I., Arsyad, H., y Bakri, B. (2020). Investigating the effects of liquid-plasma treatment on tensile strength of coir fibers and interfacial fiber-matrix adhesion of composites. *Composites Part B: Engineering*, 183: 107722. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107722>

Radoor, S., Karayil, J., Jayakumar, A., y Siengchin, S. (2021). Investigation on mechanical properties of surface-treated natural fibers-reinforced polymer composites. En *Biocomposites from lignocellulosic biomass: technology and applications* (pp. 135–162). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527822331.ch7>

Ravishankar, P., Arya, M., Dhakal, H., Gouda, F., Skrifvars, M., y Khalili, P. (2024). Assessing the mechanical performance of natural fiber thermoplastic composite sandwiches for advanced applications. *Results in Materials*, 23: 100600. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100600>

Renault, H., Werck-Reichhart, D., y Weng, J. K. (2019). Harnessing lignin evolution for biotechnological applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 56: 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.10.011>

Velásquez Restrepo, S. M., Pelaéz Arroyave, G. J., y Giraldo Vásquez, D. H. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *Informador Técnico*, 80(1): 77–86. <https://doi.org/10.23850/22565035.32>

Rozman, H. D., Tan, K. W., Kumar, R. N., Abubakar, A., Mohd. Ishak, Z. A., y Ismail, H. (2000). The effect of lignin as a compatibilizer on the physical properties of coconut fiber-polypropylene composites. *European Polymer Journal*, 36(7): 1483–1494. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00200-1](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00200-1)

Sari, P. S., Thomas, S., Spatenka, P., Ghanam, Z., y Jenikova, Z. (2019). Effect of plasma modification of polyethylene on natural fibre composites prepared via rotational moulding. *Composites Part B: Engineering*, 177: 107344. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107344>



- Santiago-Saenz, Y. O., Guzmán-Ortiz, F. A., Acevedo-Sandoval, O. A., y Román-Gutiérrez, A. D. (2016). Agricultura sustentable: una alternativa para suelos cebaderos en Hidalgo. En L. Díaz-Batalla, C. A. Gómez-Aldapa, J. Castro-Rosas, y A. Téllez-Jurado (Coords.), *Biotecnología y alimentos en Hidalgo: transitando a la bioeconomía* (pp. 72–86). Amalgama Arte Editorial S.A. de C.V. <https://www.researchgate.net/publication/327097549>
- Soriano-Corral, F., Calva-Nava, L. A., Hernández-Gámez, J. F., Hernández-Hernández, E., González-Morones, P., Ávila-Orta, C. A., Soria-Arguello, G., Fonseca-Florido, H. A., Covarrubias-Gordillo, C. A., y Díaz de León-Gómez, R. E. (2021). Influence of ethylene plasma treatment of agave fiber on the cellular morphology and compressive properties of low-density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer/agave fiber composite foams. *Journal of Composites*, 2021: 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/9150310>
- Majewski, T., & Bautista, A. B. (2012). *Plásticos reforzados con fibras naturales en el sector automotriz*. Ideas en Ciencia, 1(2), 38–39. Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense.
- Trivedi, P., y Fardim, P. (2019). Recent advances in cellulose chemistry and potential applications. En *Green materials for sustainable water remediation and treatment* (pp. 99–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3768-0_4
- Turrado, J., Saucedo, A., Ramos, J., y Reynoso, M. (2008). Comportamiento de la fibra de celulosa reciclada en el proceso de hidratación. *Información Tecnológica*, 19(5): 59–64. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000500014>
- Verdejo Márquez, R., López Manchado, M. A., y Santiago Bethencourt, A. (2022). Polímeros reforzados con fibras basados en matrices termoplásticas (Patente núm. ES2906674A1). Oficina Española de Patentes y Marcas.
- Wu, J., Du, X., Yin, Z., Xu, S., y Zhang, Y. (2019). Preparation and characterization of cellulose nanofibrils from coconut coir fibers and their reinforcements in biodegradable composite films. *Carbohydrate Polymers*, 211: 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.093>
- Wei, L., McDonald, A. G., y Stark, N. M. (2015). Grafting of bacterial polyhydroxybutyrate (PHB) onto cellulose via in situ reactive extrusion with dicumyl peroxide. *Biomacromolecules*, 16(3): 1040–1049. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b00049>
- Yu, O., y Kim, K. H. (2020). Lignin to materials: a focused review on recent novel lignin applications. *Applied Sciences*, 10(13): 4626. <https://doi.org/10.3390/app10134626>

