

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A
PARTIR DE FIBRAS MODIFICADAS DE RAQUIS DE PALMA ACEITERA Y UNA
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO POST-CONSUMO**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CINDY VANESSA GUTIÉRREZ ESTUPIÑÁN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2023

**ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A
PARTIR DE FIBRAS MODIFICADAS DE RAQUIS DE PALMA ACEITERA Y UNA
MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIESTIRENO EXPANDIDO POST-CONSUMO**

CINDY VANESSA GUTIÉRREZ ESTUPIÑÁN

Trabajo de Grado para Optar al Título de:

Magíster en Ingeniería de Materiales

Director

MSc. José Carlos Gutiérrez Gallego

Codirectores

Ph.D. Cristian Camilo Viáfara Arango

M.I. Carlina Sofía Margarita Londoño Montes

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2023

Dedicatoria

A Christopher

A Jefferson

A mi papá

Agradecimientos

*Al profesor José Carlos, quien en estos 10 años de trabajo y amistad me brindó su apoyo y su confianza para allanar mi propio camino, amplió mi perspectiva sobre la Química y me enseñó a cuestionar y orientar los saberes y proyectos, buscando la reconstrucción de una universidad y una sociedad que no se base en la obsolescencia, lo banal y lo innecesario, para empezar a **forjar desde todos los flancos un mundo que perdure** --con todo lo que esa palabra significa en cualquier ámbito donde la vida y las cosas ya no valen nada.*

A mi familia por ser andamio y refugio.

A la Universidad Industrial de Santander.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

A la Escuela de Química.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por la financiación del proyecto 2810.

Al Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido y a Carlos Villarreal.

Al profesor Cristian Viáfara por enseñarme la importancia de la organización, la constancia, el trabajo en equipo y que la dirección donde deben apuntarse las decisiones propias sobre el futuro es donde se puede ser fiel consigo mismo.

A todos los maestros y maestras por sus invaluable lecciones y acompañamiento durante estos años. Especialmente a Viviana Güiza, Ángela Montaña, Mauricio Rincón, Carlina, David Miranda y Ángel Meléndez.

A Joaquín Orozco y todos los profesionales que contribuyeron con esta investigación.

A Marcela, Mónica, Edna y Karol por la necesaria calibración.

A Rosa Urrea, Michelle Cedeño, Melba Sánchez, Sara Parra, Giselle Barón, Jose Cantillo y todos mis amigos que fueron apoyo y catalizador para concretar hasta el final este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco teórico y antecedentes.....	16
1.1 Poliestireno expandido.....	16
1.1.1 Disolución del EPS con solventes.....	17
1.1.2 Características de los solventes del EPS.....	18
1.1.3 Posibles solventes del EPS	18
1.1.4 El d-limoneno como solvente del EPS.....	19
1.2 Fibras de raquis o racimo vacío de fruta de aceite de palma (OPEFB)	20
1.2.1 Composición y generalidades de las fibras (OPEFB).....	20
1.2.2 Tratamientos químicos para las fibras de raquis (OPEFB).....	21
1.2.2.1 Tratamiento alcalino	23
1.2.2.2 Tratamiento de blanqueo.....	23
1.2.2.3 Tratamiento de modificación superficial	24
1.3 Materiales compuestos.....	24
1.3.1 Materiales compuestos a partir de fibras naturales	25
1.3.2 Materiales compuestos a partir de fibras OPEFB	26
1.3.3 Materiales compuestos con matriz de poliestireno	27
2. Objetivos.	32
2.1 Objetivo General.....	32
2.2 Objetivos Específicos.....	32
3. Metodología	33

3.1 Revisión bibliográfica y del estado del arte	33
3.2 Materiales.....	33
3.3 Preparación del material vegetal	33
3.4 Aplicación de tratamiento químico	34
3.5 Formulación de la emulsión.....	35
3.6 Elaboración del material compuesto	35
3.7 Caracterización de los aglomerados.....	38
4. Resultados y discusión	38
4.1 Análisis morfológico de las fibras OPEFB	38
4.2 Análisis químico de las fibras OPEFB modificadas	42
4.3 Caracterización de la emulsión polimérica	45
4.4 Propiedades mecánicas del material compuesto	48
4.5 Análisis estructural del material compuesto	56
5. Conclusiones	62
6. Recomendaciones	64
Referencias Bibliográficas	65

Lista de Tablas**Pág.**

Tabla 1. <i>Condiciones de fabricación de probetas preliminares</i>	36
Tabla 2. <i>Condiciones de fabricación de probetas con formulación óptima</i>	37
Tabla 3. <i>Relación de algunas propiedades a partir del ensayo de resistencia a la compresión aplicado a distintas granulometrías de fibras con tratamiento alcalino.....</i>	51
Tabla 4. <i>Relación de algunas propiedades a partir del ensayo de resistencia a la compresión aplicado a distintas granulometrías de fibras sin tratamiento alcalino.....</i>	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Representación de molécula de poliestireno (PS).....	16
Figura 2 Representación de molécula de d-limoneno.....	19
Figura 3. Micrografía SEM de fibras OPEFB con distintos tratamientos (a) fibra cruda (b) pretratamiento con NaOH (c) pretratamiento con KOH (d) pretratamiento con Al(OH) ₃ de fibra OPEFB.....	21
Figura 4. Ilustración de un típico material compuesto y la función de cada componente	25
Figura 5. Esquema de un ensayo de resistencia a la compresión.....	30
Figura 6. Fotografías de las fibras vegetales (a) Durante la inmersión en solución alcalina (b) Secado posterior de las fibras a temperatura ambiente.	34
Figura 7. Fotografía de una probeta al finalizar el ensayo de resistencia a la compresión	38
Figura 8. Micrografías SEM-BSED de fibras OPEFB crudas con corte transversal 8(a) y corte longitudinal 8(b).....	39
Figura 9. Micrografía de fibras OPEFB crudas donde se observan cuerpos de sílice incrustados en las porosidades de la superficie y su correspondiente análisis semicuantitativo SEM-EDS...	40
Figura 10. Ilustración de los cuerpos de sílice incorporados en la superficie de las fibras OPEFB (Imagen modificada a partir Law et al., 2014).....	40
Figura 11. Micrografías SEM-EDS de fibras OPEFB después de aplicar el tratamiento alcalino	41
Figura 12. Micrografía SEM-BSED de fibras OPEFB deterioradas después de aplicar un tratamiento alcalino con una concentración al 10% de NaOH	42
Figura 13. Espectro IR del OPEFB antes (rojo) y después (negro) del tratamiento alcalino con ampliación de picos característicos de muestras lignocelulósicas.	43

Figura 14. <i>Micrografía de la emulsión sin colorantes</i>	46
Figura 15 <i>Micrografías de la emulsión formulada usando un colorante hidrófobo.</i>	47
Figura 16 <i>Micrografía con magnificación 980X de la emulsión formulada usando un colorante hidrófilo de color azul brillante.</i>	47
Figura 17. <i>Esquema comparativo entre una probeta antes del ensayo de resistencia a la compresión y otra después de ser sometida al esfuerzo de compresión hasta su límite</i>	48
Figura 18. <i>Curva de esfuerzo-deformación para probetas</i>	49
Figura 19. <i>Curva de esfuerzo-deformación para una probeta de granulometría 30 Mesh donde se señala la región correspondiente a la ultra compactación de las fibras vegetales del material.</i> 50	
Figura 20. <i>Relación entre los valores obtenidos para la resistencia a la compresión de probetas de distinta granulometría con fibras de OPEFB modificadas y sin modificar.</i>	53
Figura 21. <i>Relación entre los valores obtenidos para el % de compresión de probetas de distinta granulometría con fibras de OPEFB modificadas y sin modificar.</i>	54
Figura 22. <i>Dureza estimada para probetas con tratamiento y sin tratamiento</i>	
<i>alcalino.</i>	55
Figura 23. <i>Densidad de probetas de distinta granulometría con fibras</i>	
<i>tratadas</i>	56
Figura 24. <i>Micrografía SEM-ETD de una fibra recubierta parcialmente por su matriz</i>	
<i>polimérica.</i>	57
Figura 25. <i>Micrografía SEM-ETD de una muestra del material compuesto donde se ven las fibras embebidas dentro de su matriz.</i>	57
Figura 26. <i>Micrografía SEM-BSED de una probeta con composición 1:1</i>	58

Figura 27. <i>Micrografía SEM-ETD de una fibra OPEFB sin tratar y el efecto en el recubrimiento polimérico</i>	59
Figura 28. <i>Micrografías SEM-BSED de una probeta después del ensayo de resistencia a la compresión.</i>	59
Figura 29. <i>Imagen ampliada de una probeta del material compuesto</i>	61
<i>fabricado</i>	61

Resumen

Título: Elaboración y caracterización de un material compuesto a partir de fibras modificadas de raquis de palma aceitera y una matriz polimérica de poliestireno expandido post-consumo*

Autor: Cindy Vanessa Gutiérrez Estupiñán, José Carlos Gutiérrez Gallego, Cristian Camilo Viáfara Arango, Carlina Sofía Margarita Londoño Montes**

Palabras Clave: Compósitos reforzados con fibras naturales, compósitos de PS, OPEFB, material compuesto, modificaciones químicas.

Descripción: Se desarrolló un material compuesto a partir de fibras modificadas de palma aceitera (OPEFB) y una matriz polimérica. Para el tratamiento químico se aplicó una solución de NaOH al 5% (p/v) durante 48 horas y su efecto se estudió mediante SEM y FTIR para confirmar las modificaciones morfológicas y químicas en las fibras. Se obtuvo una mejora en las condiciones de interfaz del material compuesto gracias al aumento de la unión química entre la matriz y su refuerzo al disminuirse la hidrofiliidad del material vegetal. Por otro lado, la exposición de una mayor área superficial libre de impurezas y con mayor rugosidad facilitó una adhesión física adicional. Las propiedades mecánicas del material del material compuesto desarrollado son superiores a su homólogo sin tratamiento químico para granulometrías de 30, 40, 50 y 60 Mesh. El mayor valor del módulo elástico lo presentan las probetas de 50 Mesh con 41,851 MPa y el menor valor lo tienen las probetas de 60 Mesh con 20,176 MPa. De manera similar, los valores para la resistencia última a la compresión fueron superiores y se mantiene la correlación entre probetas con fibras del mismo número Mesh, siendo la de 50 la que presenta mayor valor (16,911 MPa) y la de 60 el menor (5,726 MPa), cuya mejora con respecto a las fibras tratadas supera el 70%.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Maestría en Ingeniería de Materiales. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego. MSc. Codirector: Cristian Camilo Viáfara Arango. PhD. Codirectora: Carlina Sofía Margarita Londoño Montes. MI.

Abstract

Title: Elaboration and characterization of a composite material from modified fibers of oil palm rachis and a polymeric matrix of post-consumer expanded polystyrene *

Author: Cindy Vanessa Gutiérrez Estupiñán, José Carlos Gutiérrez Gallego, Cristian Camilo Viáfara Arango, Carlina Sofía Margarita Londoño Montes **

Keywords: Natural fiber–reinforced composites, composites PS, OPEFB, Composite material, chemical modifications

Description: A composite material was developed from modified oil palm fibers (OPEFB) and a polymeric matrix. For the chemical treatment, a 5% (w/v) NaOH solution was applied for 48 hours and its effect was studied by SEM and FTIR to confirm the morphological and chemical modifications in the fibers. An improvement in the interface conditions of the composite material was obtained thanks to the increase in the chemical union between the matrix and its reinforcement by decreasing the hydrophilicity of the vegetal material. On the other hand, the exposure of a greater surface area free of impurities and with greater roughness facilitated additional physical adhesion. The mechanical properties of the material of the composite material developed are superior to its counterpart without chemical treatment for particle sizes of 30, 40, 50 and 60 Mesh. The highest value of the elastic modulus is presented by the 50 Mesh probes with 41,851 MPa and the lowest value is by the 60 Mesh probes with 20,176 MPa. Similarly, the values for the ultimate compressive strength were higher and the connection between test tubes with fibers of the same Mesh number was maintained, with 50 having the highest value (16,911 MPa) and 60 the lowest (5,726 MPa). MPa), whose improvement with respect to the treated fibers exceeds 70%.

** Physicochemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School. Master in Materials Engineering. Director: José Carlos Gutiérrez Gallego. MSc. Codirector: Cristian Camilo Viáfara Arango. PhD. Codirector: Carlina Sofía Margarita Londoño Montes. MI.

Introducción

El planeta se encuentra en una crisis ambiental que amenaza con alcanzar el punto de inflexión que traerá consecuencias fatales para todas las especies. Como respuesta, organizaciones y gobiernos de muchos países están tomando medidas para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y mejorar la disposición de desechos post-consumo. En este marco, la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (ONU, 2019) manifestó su preocupación y recomendó unas políticas para la gestión eficaz de los residuos plásticos, teniendo en cuenta que solo se ha reciclado el 9% de los 9.000 millones de toneladas de plástico producidos en la historia y que la mayor parte termina en vertederos y en todo tipo de ecosistemas. Estos esfuerzos, suficientes o no, ya hacen parte de las directrices que encaminan la investigación a nivel global y nacional a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) integrados a la Agenda 2030 de la ONU (González, Ico & Murillo, 2022).

Entre los numerosos tipos de plástico presentes en el medio ambiente, el poliestireno expandido (EPS) -comúnmente conocido en Colombia como icopor- ha ganado especial atención debido a su impacto negativo (Ullah *et al.* 2023). Se trata de uno de los polímeros de un solo uso más desechados en el mundo y tarda más de 500 años en degradarse, causando un gran impacto durante su largo camino hacia la descomposición, no solo por el poliestireno, sino también por sus aditivos y su proceso de fabricación (Kwon *et al.*, 2015).

En el caso de los residuos orgánicos tampoco existe un mejor manejo, aun cuando en Colombia la agroindustria es un renglón importante de la economía. En el país se producen más de 1.7 millones de toneladas de palma aceitera en cuyo proceso de extracción se genera un 25% de raquis o racimo vacío de fruta de aceite de palma (OPEFB, por sus siglas en inglés) como

desecho (Fedepalma, 2022), compuestas principalmente por celulosa y en menor cantidad por lignina y hemicelulosa (Mohammed *et al.*, 2015). Esta gran cantidad de material vegetal es acumulado o llevado a la incineración, poniendo de manifiesto un problema que debe ser tratado.

En este contexto, los materiales compuestos basados en fibras naturales han surgido como una opción prometedora para abordar los desafíos ambientales y reducir la dependencia de los materiales convencionales derivados de recursos no renovables, logrando aumentar la vida útil de las fibras o cáscaras vegetales antes de recurrir al compostaje u otras prácticas sostenibles de disposición final. Estos materiales compuestos presentan numerosas ventajas en múltiples aspectos. En primer lugar, las fibras naturales son biodegradables y renovables, lo que reduce la acumulación de residuos y minimiza la dependencia de los recursos no renovables. Además, su producción requiere menos energía y emite menos gases de efecto invernadero en comparación con los materiales compuestos basados en fibras de vidrio o carbono (Mann *et al.*, 2020).

Los materiales compuestos se pueden definir como sistemas estructurales que combinan dos o más componentes con propiedades complementarias para obtener un rendimiento superior al de los materiales individuales (Kumar, *et al.*, 2022). En el caso de los materiales compuestos basados en fibras naturales, se utilizan fibras derivadas de fuentes renovables, como el bambú, el lino, el cáñamo o la fibra de coco, entre otras (Kemi *et al.*, 2020). Además de su sostenibilidad, los materiales compuestos basados en fibras naturales también ofrecen propiedades mecánicas destacables. Al combinarse con la matriz polimérica, pueden proporcionar una resistencia y tenacidad superiores a las fibras sintéticas, además de una buena capacidad de absorción de energía, lo que los hace aptos para diversas aplicaciones, como la construcción, la industria automotriz y aeroespacial, entre otras (Or *et al.*, 2017).

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de la matriz, las fibras y de su adhesión interfacial. Esta se debe a varios factores que incluyen la naturaleza de sus componentes y su polaridad (Alawar *et al.*, 2009). Por tanto, sin un tratamiento previo aplicado a las fibras de refuerzo se presentan efectos indeseados como tensiones internas y porosidad, que traen como consecuencia una aceleración de su degradación ambiental, absorción de humedad y desunión de sus componentes con el tiempo (Saba *et al.*, 2017; Prabhu, 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto de investigación tiene como propósito desarrollar un material compuesto a partir de fibras modificadas de raquis de palma aceitera y una matriz de poliestireno, a partir de poliestireno expandido (EPS) postconsumo. Con el fin de mejorar la adhesión interfacial entre las fases, se propone la modificación superficial de las fibras a través de un tratamiento químico alcalino (Izani, 2013). La metodología propuesta espera responder a las preguntas de investigación: ¿Qué efecto tiene un tratamiento químico en la adhesión interfacial de las fibras de OPEFB y una matriz polimérica de EPS? ¿Es posible mejorar las propiedades mecánicas de un material compuesto de fibras de OPEFB sin tratar y EPS post-consumo?

Desarrollar un material compuesto de esta naturaleza puede ser el inicio de una línea de aglomerados similares a la madera que se produzcan a un menor costo, teniendo en cuenta que gran parte de su materia prima está constituida por residuos. No hay duda de que con un mayor desarrollo es factible que este tipo de compósitos se conviertan en una alternativa económica y de fácil fabricación que pueda tener un impacto positivo para las comunidades que viven alrededor de los grandes monocultivos, pudiendo eliminar su acumulación y revalorizar los desechos transformándolos en otros materiales que extiendan su vida útil.

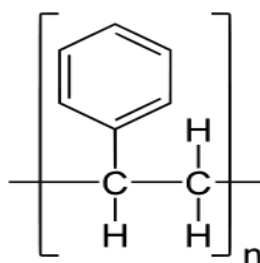
1. Marco teórico y antecedentes

1.1 Poliestireno expandido

El poliestireno expandido (EPS, del inglés *Expanded Polystyrene*) es un material ampliamente utilizado debido a sus propiedades únicas, pero su disposición final plantea desafíos ambientales. El EPS (ver Figura 1) se caracteriza por su estructura celular cerrada, compuesta por perlas granuladas del polímero que están formadas principalmente por aire encapsulado dentro de una matriz (Ho, Roberts & Lucas, 2018). Su versatilidad, bajo costo y baja densidad, hacen que sea muy atractivo y útil. A diferencia de otros polímeros, el EPS no se recicla normalmente porque no es rentable debido a que un 98% de su composición es aire y tan solo el 2% restante es poliestireno (materia prima), haciendo que ocupe un gran volumen comparado con respecto a otros polímeros comunes (Schmidt, 2011).

Figura 1

Representación de molécula de poliestireno (PS)



La contaminación por poliestireno expandido se origina principalmente en la forma de envases de alimentos, bandejas, vasos, tazas y productos de embalaje. Estos artículos a menudo terminan en vertederos, ríos, océanos y otros ecosistemas naturales, donde se fragmentan en microplásticos y nanoplásticos. Estos pueden ser ingeridos por animales marinos y terrestres, lo que puede tener efectos perjudiciales en su salud y en las cadenas alimentarias. Además, la

producción de poliestireno expandido implica el uso de recursos no renovables, como el petróleo, y la liberación de gases de efecto invernadero durante su fabricación. Esto contribuye al cambio climático y a la degradación ambiental a largo plazo (Hwang *et al.*, 2020).

1.1.1 Disolución del EPS con solventes

Cuando un solvente adecuado entra en contacto con el EPS, ocurren varios procesos (Gutiérrez *et al.*, 2013):

- a. Penetración: El solvente comienza a penetrar en las células de aire y en los espacios vacíos dentro de la estructura porosa del poliestireno expandido. Esto se debe a la afinidad del solvente por las moléculas de poliestireno y su capacidad para interactuar con ellas.
- b. Solubilización: A medida que el solvente penetra en la estructura del EPS, interactúa con las cadenas de polímero del poliestireno. El solvente es capaz de romper las fuerzas intermoleculares, como las interacciones dipolo-dipolo y las fuerzas de dispersión que mantienen unidas a las cadenas de poliestireno. Como resultado, las cadenas de polímero se separan y se dispersan en el solvente, lo que da lugar a la solubilización del poliestireno expandido.
- c. Difusión y dispersión: A medida que el solvente disuelve el EPS, las moléculas de polímero se difunden y dispersan en el solvente, formando una solución homogénea. La difusión ocurre debido a las diferencias de concentración entre el poliestireno y el solvente, lo que permite que las moléculas de polímero se dispersen por todo el volumen.

Es importante destacar que la disolución del EPS puede verse afectada por varios factores, como la concentración y temperatura del solvente, la presencia de impurezas y la duración del

tiempo de contacto entre el solvente y el material. Su disolución con solventes es un proceso irreversible y conlleva cambios en la estructura y propiedades del material (García *et al.*, 2009).

1.1.2 Características de los solventes del EPS

Los solventes utilizados en el EPS deben tener ciertas características para ser efectivos en su procesamiento y reciclaje. Algunas de las características importantes de los solventes son:

- a) Capacidad de disolución: Los solventes deben tener la capacidad de disolverlo.
- b) Baja viscosidad: Los solventes de baja viscosidad permiten una mejor penetración en la estructura celular del EPS, mejorando la eficiencia del proceso.
- c) Estabilidad química: Los solventes deben ser químicamente estables para evitar reacciones no deseadas con el polímero y garantizar la calidad del material reciclado.
- d) Baja toxicidad: Los solventes con baja toxicidad son preferibles para minimizar los impactos ambientales y los riesgos para la salud (Ginzburg *et al.*, 2020).

1.1.3 Posibles solventes del EPS

Debido a su estructura porosa, el EPS no se disuelve fácilmente en la mayoría de los solventes orgánicos comunes utilizados para disolver el poliestireno sólido. Estos solventes no pueden penetrar eficientemente en la estructura de celdas y, por lo tanto, no son efectivos para disolverlo (Cerit *et al.*, 2021).

Sin embargo, hay algunos solventes que pueden ser utilizados para disolver selectivamente el EPS. Uno de los solventes más comunes es la acetona. Esta tiene la capacidad de romper sus uniones químicas, permitiendo que el polímero se disuelva. Es importante destacar que, si bien la acetona puede disolverlo, también puede afectar la estructura de las celdas, causando su colapso y reduciendo la capacidad de recuperación del material. El tolueno, el xileno, el tetrahidrofurano y el diclorometano se encuentran entre los solventes más utilizados para disolver el EPS debido a su

capacidad para romper las fuerzas intermoleculares presentes en el polímero (Singhal *et al.*, 2019). Sin embargo, estos no son inocuos para el medio ambiente y su toxicidad impide que productos de EPS reciclados sean usados como envases de alimentos, lo cual no pasaría si se usara un “solvente verde”.

1.1.4 El d-limoneno como solvente del EPS

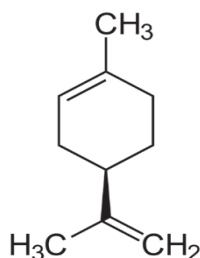
Estudios realizados por varios autores (García *et al.*, 2009; Mangalara & Varughese, 2016; Gil *et al.*, 2019) han concluido que la disolución de distintos tipos de poliestireno (PS) usando d-limoneno es posible y altamente eficiente. Los resultados mostraron que la solubilidad del PS en d-limoneno aumenta con la temperatura y la concentración del d-limoneno.

La solubilidad del poliestireno en d-limoneno es de alrededor de 0.5 g/mL y se atribuye a la capacidad del terpeno para interactuar con las cadenas poliméricas. Se ha sugerido que las interacciones entre el d-limoneno y las cadenas del PS son principalmente de naturaleza lipofílica, debido a la presencia de grupos alquilo (Ver Figura 2) (Hattori *et al.*, 2008).

Además de su capacidad para disolver el PS, el d-limoneno presenta ventajas adicionales como solvente. Es un compuesto de origen natural, biodegradable y no tóxico, lo que lo convierte en una alternativa más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con algunos solventes convencionales (García *et al.*, 2009).

Figura 2

Representación de molécula de d-limoneno. Nótese la similitud en su estructura con la molécula de PS en la Figura 1.



1.2 Fibras de raquis o racimo vacío de fruta de palma (OPEFB)

En pocos años, Colombia se ha convertido en el quinto productor mundial de palma aceitera y el primero del continente. Su rápida expansión no solo obedece a la profundización del modelo extractivista de los recursos naturales en América Latina, sino también al auge del aceite de palma en el mercado internacional. Castro (2020) advierte que el acelerado dominio de este monocultivo se ha apoyado en intervenciones paramilitares, generando un profundo daño en el tejido social y económico del país.

En Colombia hay más de 120.000 ha de plantaciones de palma aceitera, pertenecientes a la especie *Elaeis guineensis* y a la familia *Palmacea* (Fedepalma, 2022). Su producción suele tener baja eficiencia y la imparable expansión de su cultivo genera enormes cantidades de restos vegetales que causan problemas ambientales y de salud pública, haciendo que sea necesario buscar una salida para todos los subproductos del proceso de extracción de aceite.

1.2.1 Composición y generalidades de las fibras (OPEFB)

Las fibras de palma OPEFB son un subproducto fibroso generado durante el procesamiento de los frutos vacíos de la palma de aceite (alrededor del 25% del fruto). Estas fibras se han convertido en un área de interés en la investigación debido a su abundancia, disponibilidad y potencial de aplicaciones en diversos campos (Momoh & Osofero, 2020; Noah, 2022; Ahmad *et al.*, 2023).

Las fibras de palma OPEFB se caracterizan por su estructura fibrosa y su composición química única. En general, están compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, junto con otros componentes menores como la pectina. Su estructura fibrosa les confiere una alta resistencia mecánica y rigidez, comparada con otras fibras naturales o sintéticas, mientras que la

presencia de lignina le confiere cierta resistencia al agua y a los ataques de microorganismos (Mohammed *et al.*, 2015).

Además de sus propiedades químicas, las fibras de palma OPEFB también poseen propiedades físicas y térmicas importantes. Estas fibras suelen tener una longitud de fibra larga y una alta relación de aspecto, lo que las hace adecuadas para reforzar matrices poliméricas. También se ha observado que tienen una buena estabilidad térmica, lo que las hace potencialmente útiles en aplicaciones que requieren resistencia al calor (Adelodun *et al.*, 2020).

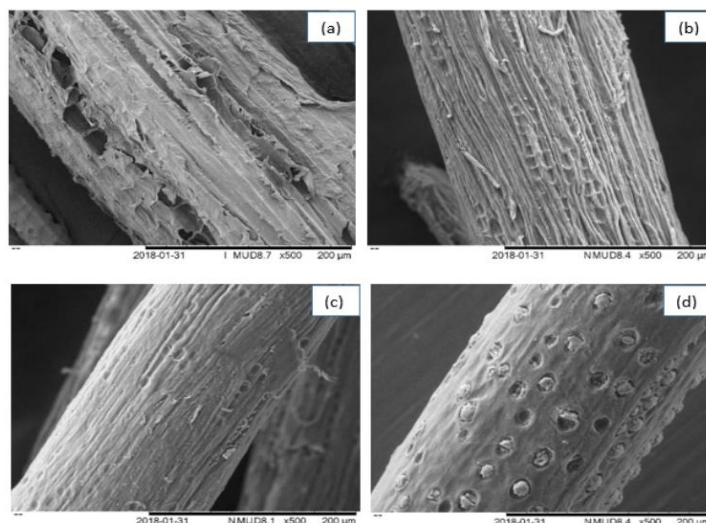
1.2.2 Tratamientos químicos para las fibras de raquis (OPEFB)

De acuerdo con Ishak *et al.* (2011), una de las limitaciones de la fibra natural es su naturaleza hidrofílica, debido a la presencia del grupo hidroxilo (OH) en toda la estructura, especialmente para la celulosa y porciones de hemicelulosa. Cuando la fibra natural está expuesta a ambientes de alta humedad, estos grupos hidroxilo atraen moléculas de agua por interacción química. Para mejorar sus propiedades y facilitar su utilización en diversos productos, se han desarrollado tratamientos químicos específicos.

Estos tratamientos pueden modificar la composición química y las características físicas de las fibras, mejorando así sus propiedades y aplicaciones (Shinoj, 2011; Nurazzi *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante tener en cuenta que los tratamientos químicos pueden afectar la estructura y las propiedades originales de las fibras (ver Figura 3), por lo que se requiere un análisis cuidadoso de los efectos de cada tratamiento en particular.

Figura 3

Micrografía SEM de fibras OPEFB con distintos tratamientos (a) fibra cruda (b) pretratamiento con NaOH (c) pretratamiento con KOH (d) pretratamiento con $Al(OH)_3$ de fibra OPEFB



Nota. Micrografías en SEM de fibras OPEFB con varios tratamientos donde se observan cambios significativos en la morfología. Adaptado de “Structural and morphological studies on alkaline pre-treatment of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fiber for composite production” (p.1109), Latip, N. A., Sofian, A. H., Ali, M. F., Ismail, S. N., & Idris, D. M., 2019. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 17, p. 1105-1111.

Estudiar las fibras tratadas y no tratadas mediante espectros IR permite verificar cualitativamente si las reacciones químicas ocurrieron. En el caso de un tratamiento alcalino se reducen los enlaces de hidrógeno en grupos hidroxilo celulósicos, incrementando la concentración de OH. Después del tratamiento se espera un aumento en la intensidad del pico de OH alrededor de 3450 cm^{-1} . Por su parte, la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) permite observar los cambios en la superficie de las fibras antes y después del tratamiento químico. Sreekala, Kumaran & Thomas (1997) usaron esta técnica para establecer diferencias después del tratamiento alcalino en fibras de OPEFB e hicieron observaciones relacionadas con la porosidad, la presencia de sílice y la rugosidad (ver Figura 3).

1.2.2.1 Tratamiento alcalino

El tratamiento alcalino es uno de los métodos más comunes utilizados para mejorar las propiedades de las fibras de palma OPEFB. Consiste en sumergir las fibras en una solución alcalina, generalmente hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), a diferentes concentraciones y temperaturas. Este tratamiento provoca la remoción parcial de lignina y hemicelulosa de las fibras, lo que resulta en una mayor pureza de celulosa y una mejora en la resistencia y la rigidez de las fibras (Machaka *et al.*, 2014). Además de la remoción de componentes indeseables como polvo y ceras, los tratamientos alcalinos también pueden provocar cambios en la morfología de las fibras. Estos tratamientos pueden ocasionar una disminución en el diámetro de las fibras, así como un aumento en su rugosidad superficial y su área de superficie específica. Estos cambios morfológicos pueden afectar la capacidad de adherencia de las fibras a las matrices poliméricas y, por lo tanto, influir en las propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras de palma OPEFB (Sreekala, Kumaran & Thomas, 1997; Radzi *et al.*, 2019).

1.2.2.2 Tratamiento de blanqueo

El tratamiento de blanqueo se utiliza para eliminar impurezas y compuestos no deseados de las fibras de palma OPEFB, como lignina residual y colorantes naturales. Se lleva a cabo mediante la aplicación de agentes blanqueadores químicos, como peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y dióxido de cloro (ClO_2). Este tratamiento blanquea las fibras al eliminar la lignina y reduce la presencia de compuestos que puedan afectar su apariencia y propiedades mecánicas. Es importante destacar que los tratamientos de blanqueo deben ser controlados adecuadamente para evitar la degradación excesiva de las fibras. Un exceso de blanqueo puede afectar negativamente las propiedades mecánicas de las fibras y reducir su resistencia. Por lo tanto, es necesario establecer

condiciones de tratamiento óptimas para garantizar una mejora en la blancura de las fibras sin comprometer su integridad estructural (Chen *et al.*, 2017; Rayung *et al.*, 2014).

1.2.2.3 Tratamiento de modificación superficial

El tratamiento de modificación superficial se utiliza para mejorar la compatibilidad de las fibras de palma OPEFB con matrices poliméricas. Se basa en la aplicación de agentes de acoplamiento, como silanos o polímeros compatibilizantes, en la superficie de las fibras. Estos agentes promueven la adhesión entre las fibras y la matriz polimérica, mejorando así las propiedades de las fibras reforzadas y la transferencia de esfuerzos entre ambos materiales (Xie *et al.*, 2010; Khalil & Ismail, 2000).

1.3 Materiales compuestos

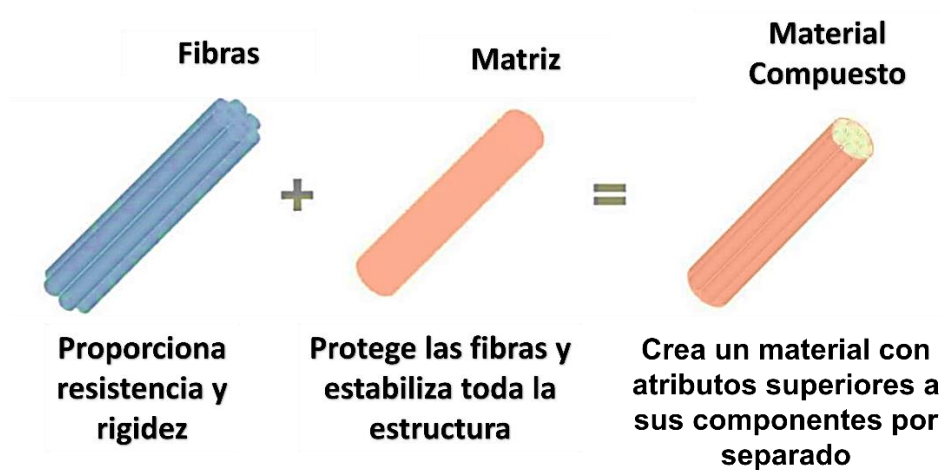
Los materiales compuestos son una clase de materiales que combinan dos o más componentes con diferentes propiedades físicas y químicas para obtener características superiores en comparación con los materiales individuales. Estos materiales han experimentado un crecimiento significativo en su uso y desarrollo en diversos campos. Los materiales compuestos se componen de una matriz y refuerzos, que pueden ser fibras, partículas o láminas. La matriz proporciona protección a la estructura y estabilidad, mientras que los refuerzos agregan rigidez, resistencia mecánica y otras propiedades específicas (Lalit, Mayank & Ankur, 2018).

En general, las matrices poliméricas se pueden dividir en dos tipos; uno es de base petroquímica sintética llamada matriz sintética (poliéster, polipropileno (PP), polietileno (PE), epoxi, etc.) y la otra es natural o de base biológica llamada matriz biodegradable (Faruk *et al.*, 2012). Se destacan las características de la interfaz entre la matriz y los refuerzos pues juega un papel crucial en la transferencia de carga y el rendimiento global del material compuesto.

Los materiales compuestos exhiben una serie de propiedades superiores en comparación con los materiales convencionales, como una alta resistencia específica, alta rigidez, baja densidad, alta resistencia a la corrosión y al impacto y alta resistencia a la fatiga. Estas propiedades hacen que los materiales compuestos sean ideales para aplicaciones donde se requiere un equilibrio entre peso ligero y alto rendimiento estructural (Barbero, 2018).

Figura 4

Ilustración de un típico material compuesto y la función de cada componente



1.3.1 Materiales compuestos a partir de fibras naturales

Este tipo de materiales compuestos (NFRCs, por sus siglas en inglés) tienen componentes naturales como fibras, polímeros, minerales y matrices de origen vegetal, animal o mineral. Estos componentes se seleccionan cuidadosamente para aprovechar sus propiedades intrínsecas y se combinan para crear materiales con características mejoradas en términos de resistencia, rigidez, durabilidad, aislamiento térmico, resistencia al fuego, entre otros aspectos (Khalil, Bhat & Jawaidd, 2019).

Entre las ventajas de los NFRCs se encuentra que son livianos, de menor costo y presentan baja densidad debido a las fibras vegetales y su estructura celular hueca; sus fibras no son tóxicas

ni abrasivas o irritantes para la piel y, en general, su maquinación es sencilla y no representa un desgaste significativo para las herramientas (Maya & Sabu, 2008). Las propiedades de los materiales compuestos dependen de la matriz, las fibras y de su unión interfacial. La adhesión entre ambos juega un papel importante, ya que la transferencia de tensión entre la matriz y las fibras determina la eficiencia del refuerzo. Esta depende de varios factores que incluyen la naturaleza de sus componentes y la polaridad de sus fases (Alawar, Hamed & Al-Kaabi, 2009). Las fibras vegetales incluyen fibras de hojas (piña, sisal y abacá), fibras del núcleo (cáñamo, yute y kenaf), fibras de hierba y caña (trigo, maíz y arroz), fibras de semillas (algodón, ceiba y fibra de coco), fibras de líber (lino, yute, cáñamo, ramio y kenaf), y todos los demás tipos (madera y raíces), según recopilación de estudios de Lotfi (2021) y su equipo. En general, los materiales fabricados a partir de fibras naturales presentan diversas aplicaciones y propiedades similares a los aglomerados fabricados con la madera (Chun *et al.*, 2019; Ahmad *et al.*, 2020).

1.3.2 Materiales compuestos a partir de fibras OPEFB

La composición de las fibras OPEFB varía con las condiciones ambientales, el suelo y otros factores (Hassan *et al.*, 2010). Su componente mayoritario es la celulosa, que es un polímero natural que provee a la fibra de su estructura básica, seguida por la hemicelulosa que es un polisacárido íntimamente unido con las microfibrillas de celulosa; en menor cantidad está la lignina que es la responsable de proveer rigidez a las fibras, sirve como un pegamento químico y presenta una polaridad menor que la celulosa (Ahmad *et al.*, 2023).

La estructura fibrosa de las fibras de palma OPEFB confiere una alta resistencia y rigidez a los materiales compuestos, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren una alta resistencia y baja densidad (Faizi *et al.*, 2017; Ramlee, Naveen & Jawaid, 2021).

La adhesión entre las fibras de palma OPEFB y las matrices poliméricas es un factor crucial para determinar las propiedades de los materiales compuestos. Diversos tratamientos de superficie se han utilizado para mejorar la adhesión entre las fibras y las matrices poliméricas. Estos tratamientos promueven la interacción entre las fibras y las matrices, lo que resulta en una transferencia más eficiente de carga y una mejora en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos (Jawaid *et al.*, 2018).

Para la elaboración de un material compuesto de este tipo es necesario tener en cuenta que la fibra OPEFB es fuertemente polar debido a los grupos hidroxilo y los enlaces C-O-C en su estructura. Esto la hace más compatible con los polímeros polares. Debido a que el poliestireno es una molécula de baja polaridad se espera una baja compatibilidad, haciendo necesario un tratamiento químico que reduzca la polaridad de la superficie de las fibras. En un estudio realizado para fabricar aglomerados con raquis de palma aceitera (OPEFB) y una emulsión polimérica se reportó que las propiedades mecánicas no fueron aceptables a causa de una interacción interfacial pobre entre la matriz y las fibras que no recibieron un tratamiento previo (Gutiérrez, 2020). Las investigaciones alrededor de los NFRCs a partir de fibras OPEFB sugieren una gran oportunidad para continuar investigando y diversificando sus aplicaciones (Faizi *et al.*, 2017).

1.3.3 Materiales compuestos con matriz de poliestireno

Diversos tipos de refuerzos, como fibras, partículas y láminas, se han utilizado en combinación con la matriz de poliestireno para lograr propiedades específicas (Salaman, 2012). Por ejemplo, la incorporación de fibras en los materiales compuestos de poliestireno ha demostrado aumentar la resistencia mecánica, la rigidez y la resistencia al impacto de los materiales. Los refuerzos más comúnmente utilizados incluyen fibras de vidrio, fibras de carbono

y fibras de aramida. Estas actúan como refuerzos estructurales, proporcionando una mayor resistencia y rigidez al material (Balart *et al.*, 2020).

En cuanto al proceso de fabricación utilizado para producir los materiales compuestos de poliestireno puede variar según el tipo de refuerzo utilizado. Algunos de los métodos comunes incluyen la técnica de moldeo por inyección, la extrusión y la compresión. Estos métodos permiten una distribución uniforme del refuerzo en la matriz de poliestireno, asegurando una buena adhesión entre ambos componentes (Ashik & Sharma, 2015). En el moldeo por compresión, los refuerzos se colocan en un molde y se aplica presión y calor para unir la matriz de PS con los refuerzos. En el moldeo por transferencia de resina, se coloca la matriz de poliestireno en el molde y se inyecta la resina líquida que impregna los refuerzos. La extrusión implica forzar la matriz de poliestireno fundido a través de una boquilla mientras se mezcla con los refuerzos (Lotfi *et al.*, 2021).

La selección del método de fabricación depende de las propiedades deseadas del material compuesto y de la escala de producción requerida. Cada método tiene sus ventajas y desafíos, y la elección se basa en criterios técnicos y económicos. También es necesario tener en cuenta que las propiedades de los materiales compuestos con matriz de poliestireno dependen de la naturaleza de los refuerzos utilizados, su contenido y la calidad de la interfaz entre los refuerzos y la matriz (Singha *et al.*, 2010).

A pesar de la diversificación de métodos y alternativas en los materiales compuestos poliméricos con fibras naturales hace falta un mayor desarrollo en la fabricación de éstos a partir de una matriz de poliestireno -de cualquier origen- y explorar más ampliamente las potencialidades de las fibras OPEFB (Keya *et al.*, 2019; Kerni *et al.*, 2020; Rajeshkumar *et al.*, 2021.; Kumar *et al.*, 2022; Chichane *et al.*, 2023). Esto plantea un desafío para el desarrollo de una nueva línea de materiales compuestos y sus futuras aplicaciones.

1.3.4 Propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Los materiales compuestos generalmente tienen características que difieren de los materiales convencionales en ingeniería. Algunas de estas son solo modificaciones de la microestructura o su comportamiento y otras son totalmente nuevas y requieren procedimientos específicos para su análisis experimental. Dada la naturaleza heterogénea e inherente de los materiales compuestos, éstos se estudian desde los puntos de vista de la micromecánica y la macromecánica. El uso de ambos conceptos permite la adaptación de un material compuesto para encontrar un requerimiento estructural particular, siendo una de las ventajas significativas sobre otros tipos de materiales o compuestos. (Pineda, 2001)

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales pueden variar según diversos factores, como el tipo y la forma de la fibra utilizada, la orientación y el contenido de las fibras, la matriz polimérica y el método de fabricación de las probetas (Karthi *et al*, 2020). En general, las fibras naturales presentan dentro de su morfología orientaciones variadas que influyen en las propiedades que generarán dentro del material compuesto. La anisotropía inherente de los materiales compuestos guía a las características del comportamiento mecánico que son frecuentemente diferentes de los materiales isotrópicos convencionales. El procesamiento de este tipo de configuración es más simple pero no se obtiene la mejor transferencia de esfuerzos en comparación con las fibras alineadas (Dávila *et al.*, 2011).

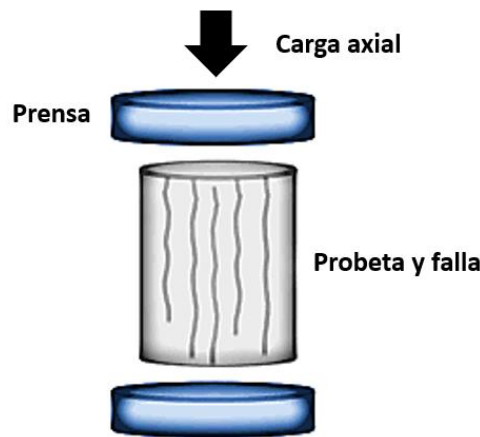
Las pruebas mecánicas comúnmente aplicadas son ensayos destructivos en las que los materiales son sometidos a diferentes tipos de esfuerzos donde las probetas se someten a una fuerza externa hasta su punto de ruptura o deformación. Con base en esto se pueden determinar diferentes propiedades como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, la resistencia a impactos, la tenacidad, entre otras (Navaneethakrishnan *et al.*, 2020). Por ejemplo, en los ensayos de impacto

se determina la cantidad de energía que el material es capaz de absorber frente a una carga de choque, mientras que en los ensayos por compresión se miden la resistencia y la capacidad de un material para soportar cargas que suelen reducir su tamaño.

El ensayo de compresión se caracteriza porque la probeta sufre una reducción en su longitud y una disminución en su volumen. Para calcular el esfuerzo a compresión del espécimen, se deben dividir la carga aplicada durante el ensayo y la sección transversal (ver Figura 5). Las dimensiones de las probetas van a depender del tipo de material que se vaya a fallar. Generalmente, es aplicado a materiales frágiles como el concreto y la madera (Tadasse *et al*, 2019).

Figura 5

Esquema de un ensayo de resistencia a la compresión



Puede medirse como:

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area promedio de la probeta}}$$

Los ensayos de compresión permiten a los fabricantes evaluar la integridad y seguridad de los materiales, componentes y productos durante varias fases del proceso de fabricación. Para que un material se seleccione para una nueva aplicación o producto debe demostrar la capacidad de

resistir cualquier fuerza mecánica que encuentre en su aplicación de uso final. Las aplicaciones potenciales pueden variar desde pruebas de resistencia del parabrisas de un automóvil hasta pruebas de resistencia de vigas de hormigón utilizadas en la construcción. Además, los materiales y productos pueden estar expuestos a fuerzas mecánicas durante periodos de tiempo cortos o largos, mediante un uso cíclico o repetido, y en una amplia variedad de condiciones ambientales y de temperatura diferentes. Por lo tanto, los ensayos de compresión se usan a menudo en materiales frágiles como hormigón, metales, plásticos, cerámica, compuestos y materiales corrugados como el cartón. Estos materiales se utilizan a menudo en una capacidad de carga donde su integridad bajo fuerzas de compresión es crítica y, en definitiva, pueden ayudar al ingeniero a ajustar el equilibrio entre la resistencia del producto y la conservación del material (Metalinspec, 2020).

En general, para los ensayos de resistencia a la flexión en este tipo de materiales se ha observado que ésta aumenta cuando se utiliza una mayor cantidad de fibras vegetales hay mayor refuerzo, pues aumentan la distribución de esfuerzos dentro de la matriz. En ensayos de resistencia a la compresión el uso de fibras cortas reduce esta propiedad, lo cual puede estar relacionado con la presencia de porosidades dentro del compuesto, formadas tanto por la congestión o agrupamiento de las fibras que altera la unión fibra-matriz produciendo vacíos. Las fibras largas suelen proveer también una mejora en la ductilidad cuando éstas detienen la extensión de las grietas, generando un aumento en la capacidad de absorción de energía del compuesto (Velandia, 2008).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un material compuesto a partir de fibras modificadas de raquis de palma aceitera y una matriz de poliestireno expandido post-consumo.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar mediante un análisis morfológico y una caracterización química el efecto de un tratamiento alcalino aplicado a las fibras de palma (OPEFB).

Formular una emulsión a partir de poliestireno expandido post-consumo que sirva como matriz polimérica de un material compuesto.

Caracterizar las fibras vegetales y el material compuesto por medio de un análisis de espectroscopía infrarroja, microscopía electrónica de barrido y la medición de algunas propiedades mecánicas presentadas en ensayos de resistencia a la compresión.

3. Metodología

3.1 Revisión bibliográfica y del estado del arte

En esta etapa se recopiló la información teórica necesaria para el desarrollo de la investigación enfocada en el estudio de la microestructura del material vegetal y las propiedades mecánicas de materiales compuestos similares, así como los resultados de un proyecto anterior donde no se modificaron las fibras. Se estudiaron trabajos desarrollados en el área de interés para encontrar el tratamiento químico más pertinente buscando mejorar las propiedades de los aglomerados.

3.2 Materiales

El material vegetal de OPEFB fue facilitado por Palmas del Cesar, donde recogieron al azar diez racimos vacíos de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) de la plantación después del proceso de extracción del aceite y fueron entregados ocho horas después al equipo de investigación. El hidróxido de sodio (NaOH) se adquirió con Sigma Aldrich y el d-limoneno con una pureza del 95.32% se compró a través de Ciacomeq S.A.S., importado de la fábrica brasilera de jugos cítricos y aceites esenciales Louis Dreyfus Company Sucos S.A. El EPS se recopiló a partir del embalaje de equipos nuevos de la Escuela de Química y se almacenó limpio y seco para evitar su contaminación.

3.3 Preparación del material vegetal

Los racimos de OPEFB se lavaron con agua para remover hongos y polvo. Fue secado a temperatura ambiente durante un mes y sometido a molienda usando un molino de martillos (núcleo de 4 martillos afilados con motor de 5 HP). Las fibras se calentaron a 105°C durante 4 horas para eliminar humedad y se tamizaron para obtener un tamaño y una longitud de fibra uniforme dentro del rango de 1 a 7 mm con diámetros de 0.04 a 0.09 mm (Portable Sieve Shaker

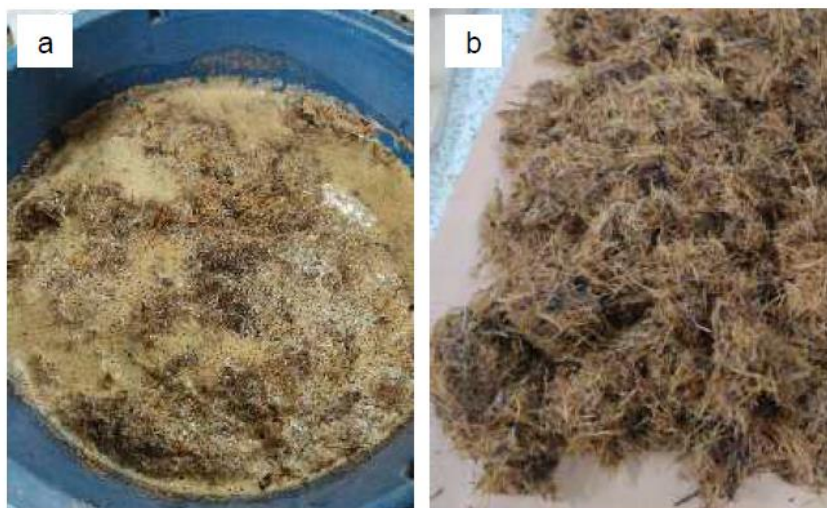
Model RX-24). Se obtuvieron distintas granulometrías (Mallas No.30, No.40, No.50 y No.60). Cada fracción se almacenó en una bolsa sellable.

3.4 Aplicación de tratamiento químico

Las fibras OPEFB previamente lavadas, molidas y tamizadas se trataron con una solución alcalina sumergiendo 2 kg de material vegetal sin tratar en 10 L de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5% (p/v) durante 48 horas. Después se lavaron las fibras con agua y se aplicaron unas gotas de ácido acético para contrarrestar el contenido excesivo de NaOH. Se usó un medidor de pH para confirmar el proceso de neutralización después del lavado para eliminar el exceso de ácido acético. Por último, las fibras se secaron en estufa a 100°C durante 7 horas (Ver Figura 6).

Figura 6

Fotografías de las fibras vegetales (a) Durante la inmersión en solución alcalina (b) Secado posterior de las fibras.



Las fibras tratadas y sin tratar fueron analizadas con una técnica analítica infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) mediante un analizador de espectroscopía Tensor II marca Bruker, donde se obtuvo la transmitancia en un rango de 4000 a 500 cm^{-1} . Luego se analizó la

morfología de las fibras mediante la técnica de SEM. Los análisis de imágenes de electrones retrodispersados (BSD, por sus siglas en inglés) y espectrometría por dispersión de energía (EDS, por sus siglas en inglés) se realizaron utilizando el microscopio electrónico de barrido ambiental FEI Quanta 650 FEG ubicado en el Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará, UIS.

3.5 Formulación de la emulsión

Para la elección del solvente del EPS se tuvo en cuenta su carácter ecológico, baja toxicidad, baja presión de vapor para facilitar su eliminación en el aglomerado, amplia disponibilidad y alta solubilidad. El solvente escogido fue el d-limoneno que se encuentra de manera natural en los aceites esenciales cítricos. Además, parte de la investigación buscaba comparar los resultados del proyecto anterior donde se usó material vegetal sin tratar, con el fin de establecer los efectos del tratamiento químico en el desempeño del compósito.

Se usó 1 L de d-limoneno para disolver 500 g de poliestireno expandido (EPS). A partir de la disolución saturada con relación 1:2 de EPS y solvente se formuló una emulsión estable. La emulsión se preparó añadiendo 100 mL de la disolución anterior a 50 mL de agua más 2% de carboximetilcelulosa y 3% de lecitina de soya como tensoactivo. Para su caracterización se usaron dos colorantes comerciales de distinta polaridad para elucidar el tipo de emulsión según sus fases bajo la técnica de microscopía óptica (Hirox KH 7700), que también permitió clasificarla según el tamaño de las micelas.

3.6 Elaboración del material compuesto

Se realizó un diseño experimental para establecer las mejores condiciones para la fabricación de las probetas, estableciendo como factores el tamaño de fibra y la cantidad de emulsión aplicada con relaciones 1:1, 1:2 y 1:3 (fibra:emulsión). Teniendo en cuenta la cantidad

limitada de material vegetal de distinta granulometría se fabricaron muestras preliminares por triplicado de la mitad del tamaño de las probetas usadas en las pruebas mecánicas posteriores, con el fin de observar detalles cualitativos durante el proceso de conformado y la interacción entre el refuerzo y su matriz polimérica mediante SEM. A continuación, se tabulan las condiciones bajo las cuales se fabricaron las probetas preliminares con tratamiento alcalino:

Tabla 1

Condiciones de fabricación de probetas preliminares con fibras de granulometría de 30 Mesh

Proporción	Cantidad de fibra	Cantidad de emulsión	Peso de probeta	Condiciones de secado	Apariencia de probeta	Observaciones
1:1	7.5 g	7.5 g	15 g	160°C 5 horas	Fibra expuesta, probeta frágil, más espacios y porosidad	No hay suficiente emulsión para aglomerar las fibras y la probeta se rompe al tacto
1:2	5 g	10 g	15 g	160°C 6 horas	Fibras embebidas en matriz sin defectos externos	La proporción de componentes dan como resultado una probeta definida que no se rompe al tacto
1:3	3.7 g	11.3 g	15 g	165°C 10 horas	Fibras embebidas en matriz con exceso de polímero en superficie	Mezcla con exceso de emulsión al mezclar y ejercer presión con el émbolo del molde. Probeta con exceso de PS superficial

Con base en los resultados, las probetas para todas las pruebas siguientes se elaboraron por triplicado mezclando las fibras tamizadas (Mallas No.30, No.40, No.50 y No.60 Mesh) y la

emulsión en una relación 1:2 (fibra:emulsión) con un peso de 30 g por probeta. Los moldes por triplicado son de fabricación propia, de geometría cilíndrica en acero inoxidable y dimensiones internas de 2 pulgadas de alto y 1 pulgada de diámetro que se ajustan a la norma ASTM D695. Dentro del molde se aplicó una presión con el émbolo hasta lograr la medida de 2 pulgadas de altura. Posteriormente, cada triplicado se llevó a calentamiento en un horno Memmert 110 que fue precalentado antes de ingresar las probetas durante 6 horas a 160°C y enfriadas a temperatura ambiente antes de desmoldar. Se mantuvo constante la presión y la temperatura en todas las probetas y se tomó como variable el parámetro del tamaño de la fibra. Las condiciones para la formulación de las probetas con tratamiento alcalino se resumen a continuación:

Tabla 2

Condiciones de fabricación de probetas con formulación óptima y distinta granulometría

Mesh	Cantidad de fibra	Cantidad de emulsión	Peso de probeta	Condiciones de secado	Medidas de probeta	Área transversal
30	10 g	20 g	30 g	160°C 6 horas	2 pulgadas de altura 1 pulgada de diámetro	506.7 mm ²
40	10 g	20 g	30 g	160°C 6 horas	2 pulgadas de altura 1 pulgada de diámetro	506.7 mm ²
50	10 g	20 g	30 g	160°C 6 horas	2 pulgadas de altura 1 pulgada de diámetro	506.7 mm ²
60	10 g	20 g	30 g	160°C 6 horas	2 pulgadas de altura 1 pulgada de diámetro	506.7 mm ²

3.7 Caracterización de los aglomerados

Para la caracterización mecánica se realizó un ensayo de resistencia a la compresión a cada triplicado de probetas (equipo de ensayos universales HSM 58 Universal Material Tester de 20 KN con prensa hidráulica manual, ubicado en la Escuela de Ingeniería Química de la UIS) bajo la Norma ASTM D695. También se analizaron micrografías para evaluar la interacción interfacial entre el refuerzo y la matriz antes y después del ensayo de resistencia a la compresión.

Figura 7

Fotografía de una probeta al finalizar el ensayo de resistencia a la compresión



4. Resultados y discusión

4.1 Análisis morfológico de las fibras OPEFB

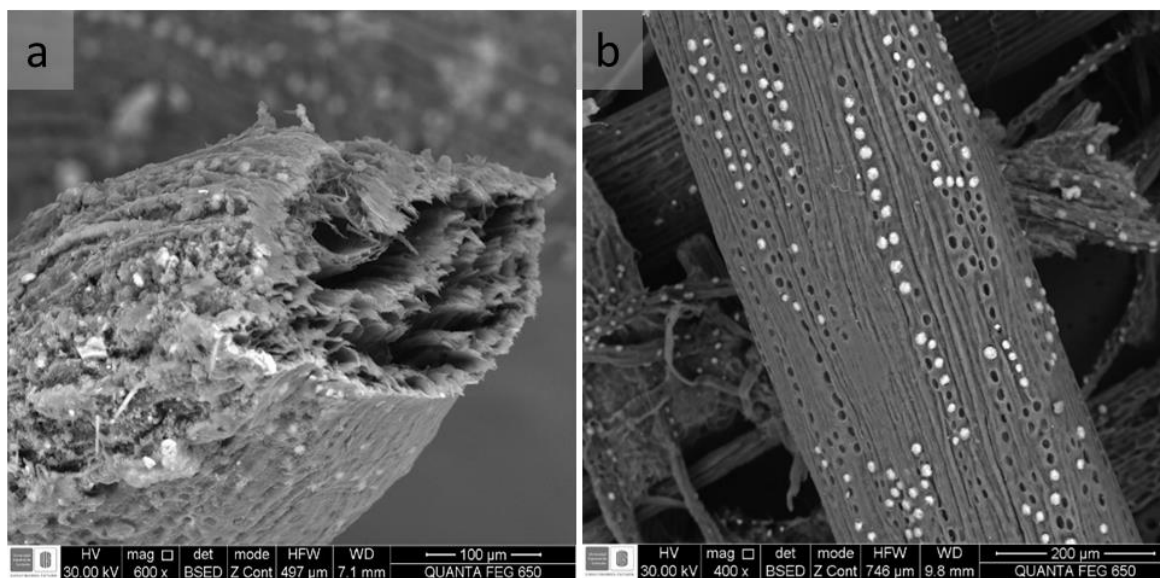
El desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras naturales implica el estudio de su composición química y la adhesión superficial que presentan para predecir si la interacción con su matriz será fuerte o no.

Los cambios físicos y la modificación estructural de las fibras OPEFB en estado crudo y con tratamiento alcalino se analizaron mediante SEM con detectores BSED y EDS. En la Figura 8 aparecen dos micrografías donde se observa la fibra OPEFB sin tratar con una superficie

relativamente lisa cubierta con una capa típica de ceras naturales, lignina, hemicelulosa y unas incrustaciones en los poros.

Figura 8

Micrografías SEM-BSED de fibras OPEFB crudas con corte transversal 8(a) y corte longitudinal 8(b).



Se estudió con mayor detalle el contenido de los poros de la superficie con un análisis semicuantitativo SEM-EDS y una magnificación de 1600X, donde se confirma que se trata de cuerpos de sílice encontrados comúnmente en este tipo de fibras (Law, Daud, & Ghazali, 2007) (Ver Figura 9). Los cuerpos silíceos presentes se originan a partir de la acumulación de sílice en el tejido vegetal de la palma de aceite durante su crecimiento. La sílice se encuentra en el suelo y se absorbe a través de las raíces, posteriormente se transporta a través del sistema vascular y se deposita en diferentes partes de la planta, incluyendo las fibras de la vaina externa (Radzi & Jamari, 2020) (Ver Figura 10). Su formación está influenciada por factores ambientales como la

disponibilidad de sílice en el suelo, la concentración en el agua de riego y la madurez del fruto de la palma (Omar *et al.*, 2014).

Figura 9

Micrografía de fibras OPEFB crudas donde se observan cuerpos de sílice incrustados en las porosidades de la superficie 9(a) y su correspondiente análisis semicuantitativo SEM-EDS 9(b).

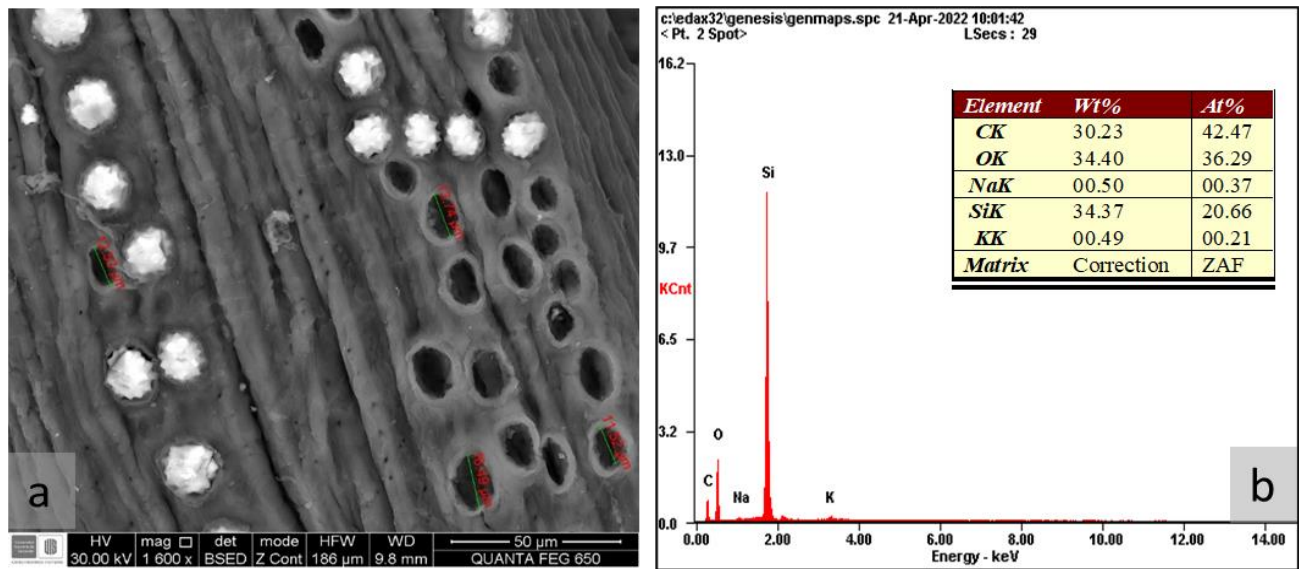
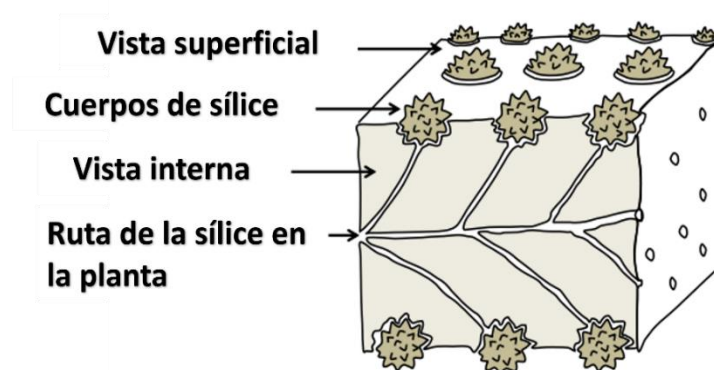


Figura 10

Ilustración de los cuerpos de sílice incorporados en la superficie de las fibras OPEFB (Imagen modificada a partir Law et al., 2014)

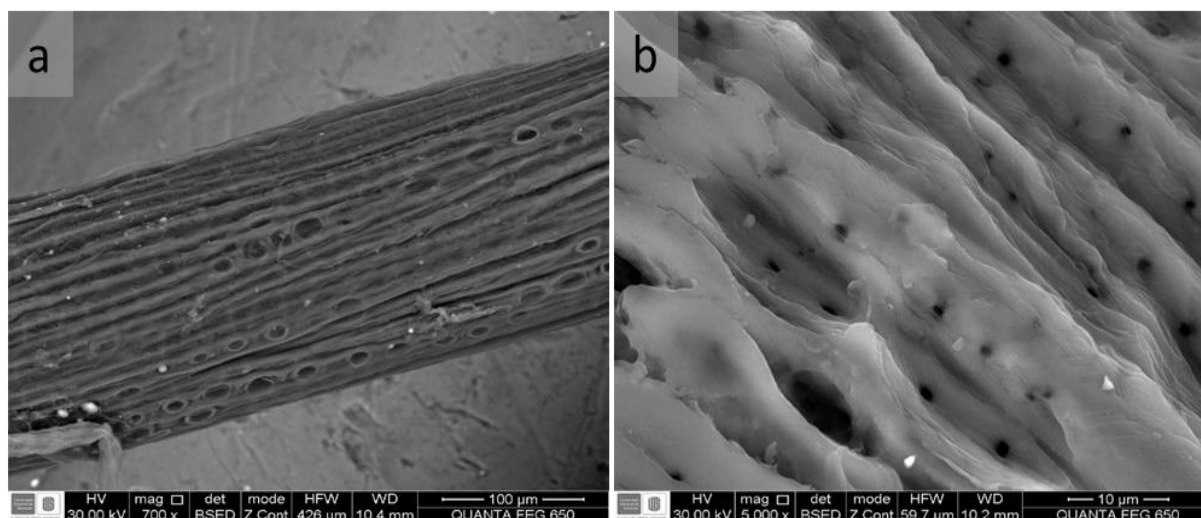


La presencia de cuerpos de sílice, ceras y otras impurezas afectan la adhesión entre la matriz polimérica y las fibras OPEFB, pero pueden ser eliminados aplicando un tratamiento químico a la

superficie (Faizi *et al.*, 2017). En la Figura 11 se pueden ver las diferencias significativas en la morfología de las fibras tratadas con un tratamiento alcalino con NaOH al 5%. Se observa una remoción en la cantidad de cuerpos silíceos y una superficie cubierta de poros expuestos y rugosidades que eventualmente facilitarán la interacción entre la matriz y las fibras en el material compuesto. La eficiencia de esta remoción se ha relacionado con la concentración de NaOH aplicado durante el tratamiento y en varias investigaciones se ha demostrado que una solución alcalina al 4-5% p/v es suficiente para eliminar la mayoría de incrustaciones de sílice (Radzi & Jamari, 2020; Chaiwong *et al.*, 2019; Latip *et al.*, 2019)

Figura 11

Micrografías SEM-EDS de fibras OPEFB después de aplicar el tratamiento alcalino



Es necesario tener en cuenta las condiciones de aplicación del tratamiento alcalino porque una solución muy concentrada o una inmersión prolongada puede romper los enlaces químicos celulósicos y degradar la estructura de las fibras, lo que resulta en una transferencia de carga deficiente y una limitación de su capacidad para actuar como refuerzo en materiales compuestos. En la Figura 12 se puede ver el efecto de un tratamiento alcalino muy agresivo sobre las fibras OPEFB generando daños severos a la estructura lignocelulósica.

Figura 12

Micrografía SEM-BSED de fibras OPEFB deterioradas después de aplicar un tratamiento alcalino con una concentración al 10% de NaOH

**4.2 Análisis químico de las fibras OPEFB modificadas**

La aplicación del tratamiento alcalino en las fibras OPEFB supone un mecanismo básico que se podría representar de esta manera: $Fibra -OH + NaOH = Fibra -O^- Na^+ + H_2O$

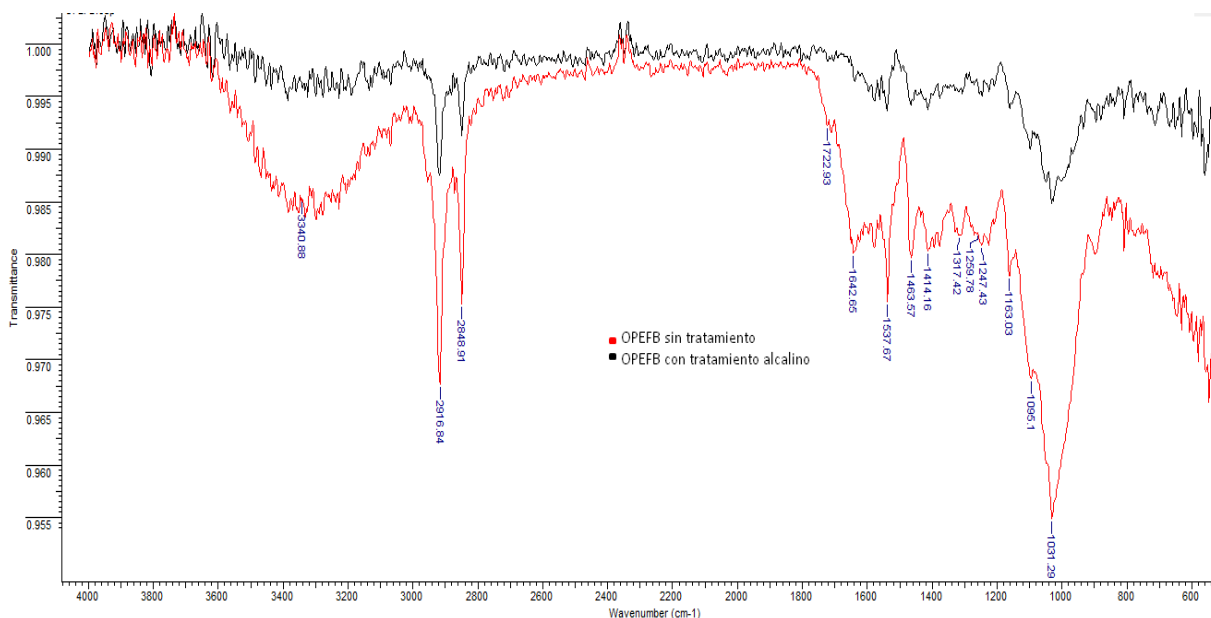
La modificación más importante realizada por el tratamiento alcalino es la disminución de los enlaces de hidrógeno de origen lignocelulósico en la estructura de la red, lo que aumenta la rugosidad de la superficie. Más detalladamente, este tratamiento elimina una cierta cantidad de lignina, cera y aceites que cubren la superficie externa de la pared celular de la fibra, despolimeriza la celulosa y expone los cristales de longitud corta. La adición de hidróxido de sodio acuoso (NaOH) a la fibra natural promueve la ionización del grupo hidroxilo al alcóxido (R-O⁻). Por lo tanto, el procesamiento alcalino influye directamente en las fibras celulósicas, el grado de polimerización y la extracción de lignina y compuestos hemicelulósicos (Torres & Aragón, 2006).

Este tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) al 5% lleva a una mercerización irreversible que incrementa la cristalinidad de la celulosa para formar una región amorfa que permite la descomposición de los grupos O-H provenientes de la solución alcalina para reaccionar con las moléculas de agua y luego abandonar la estructura de la fibra (Li, Tabil & Panigrahi, 2007).

Cuando esta reacción elimina una cantidad importante de lignina, cera y hemicelulosa que recubre la superficie se genera una reducción de la hidrofiliidad de las fibras. Este proceso vuelve las fibras más compatibles con la matriz polimérica de menor polaridad cuando se quieren incorporar en materiales compuestos de este tipo (Latip *et al.*, 2019). En la Figura 13 se observa el espectro FTIR de fibras OPEFB sin tratar y después del tratamiento alcalino. Las principales bandas de absorción se ubican en los picos 3341, 2917, 2849, 1723, 1643, 1537, 1095 y 1031 cm^{-1} .

Figura 13

Espectro IR del OPEFB antes (rojo) y después (negro) del tratamiento alcalino con ampliación de picos característicos de muestras lignocelulósicas.



Al comparar los espectros FTIR de la fibra OPEFB sin tratar y la tratada, se observa que existe una similitud estructural. Los picos en la región comprendida entre 770 y 2850 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento C-O y C-H que están presentes en la fibra sin tratar. Al modificarse, estos picos disminuyen ya que el tratamiento con NaOH puede reducir los enlaces de hidrógeno en los grupos hidroxilo celulósicos. La señal de absorbancia de 3341 cm^{-1} corresponde al estiramiento O-H típicamente entre 3200 y 3600 cm^{-1} en los enlaces de hidrógeno de la red, que disminuye debido a la ruptura de enlaces entre los grupos O-H de celulosa y hemicelulosa. También se logra disminuir la intensidad de los picos en la región de los 2910 cm^{-1} que representa la vibración de estiramiento C-H de metil y metileno en la celulosa y hemicelulosa (Latip *et al.*, 2019).

Los picos correspondientes a la región del estiramiento C=O del grupo carboxílico (1723 , 1643 , 1537 cm^{-1}) desaparecen con el tratamiento alcalino. Esto puede deberse a la eliminación del grupo carboxílico por parte del hidróxido de sodio. Los grupos carboxílicos pueden estar presentes en la superficie de la fibra a partir de trazas de ácidos grasos presentes y su relación radica en que los tratamientos alcalinos eliminan la insaturación presente en las trazas de los aceites. Estos cambios en los grupos carboxílicos pueden ser consecuencia también de la extracción de hemicelulosa y ligninas y/o la formación de carboxilatos cuando las extracciones han sido incompletas (Sreekala, Kumaran & Thomas, 1997).

A partir de estos estudios está claro que se produjeron varias reacciones químicas durante los tratamientos. Esto condujo a un aumento en la cantidad de celulosa amorfa a expensas de la

celulosa cristalina (El Oudiani *et al.*, 2011) que se puede verificar en las micrografías en SEM de la Figura 10. Estas reacciones generadas por el tratamiento alcalino tienen como consecuencia:

1. Aumento de la rugosidad de la superficie que puede facilitar una mejor interacción mecánica en las condiciones de interfaz entre las fibras y su matriz polimérica.
2. Aumento en la cantidad de celulosa expuesta en la superficie de la fibra, aumentando así el número de posibles sitios de reacción.
3. Disminución de la polaridad de las fibras haciéndola más compatible con una matriz polimérica.

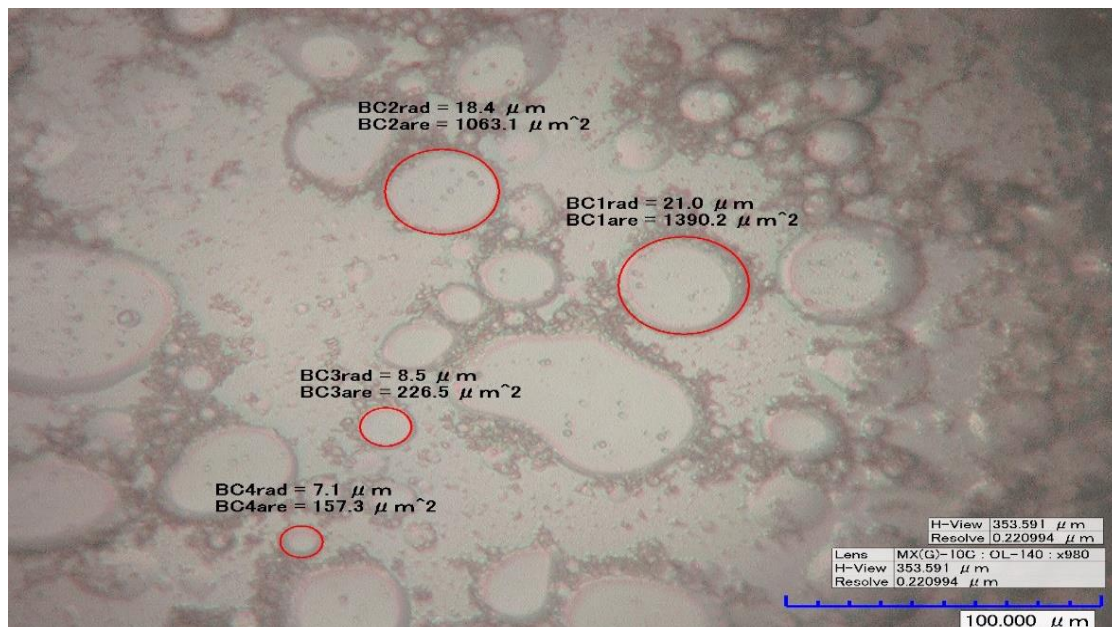
Con lo anterior, se espera que el tratamiento alcalino tenga un efecto positivo en la adhesión interfacial y la compatibilidad entre las fibras OPEFB y la matriz de poliestireno del material compuesto, produciendo mejores propiedades mecánicas que su homólogo sin tratamiento químico.

4.3 Caracterización de la emulsión polimérica

La caracterización de la emulsión formulada como matriz polimérica del material compuesto se realizó por microscopía óptica. Para clasificar la emulsión según su tamaño de partícula se tomaron micrografías en cinco puntos diferentes de diez muestras y se midió el diámetro de algunas micelas (Figura 14). Las marcas micrográficas registran un rango entre 0.9 y 35.4 μm de radio. Los tamaños micelares comprendidos entre 0.2 μm y 20 μm corresponden con las macroemulsiones, según lo indicado por Kale & Deore (2017). Estas presentan típicamente una apariencia turbia y viscosa porque las interfaces de muchas fases dispersan la luz a medida que pasa a través de la emulsión. Por tanto, se puede concluir que se trata de una macroemulsión.

Figura 14

Micrografía de la emulsión sin colorantes con algunas marcas micrográficas

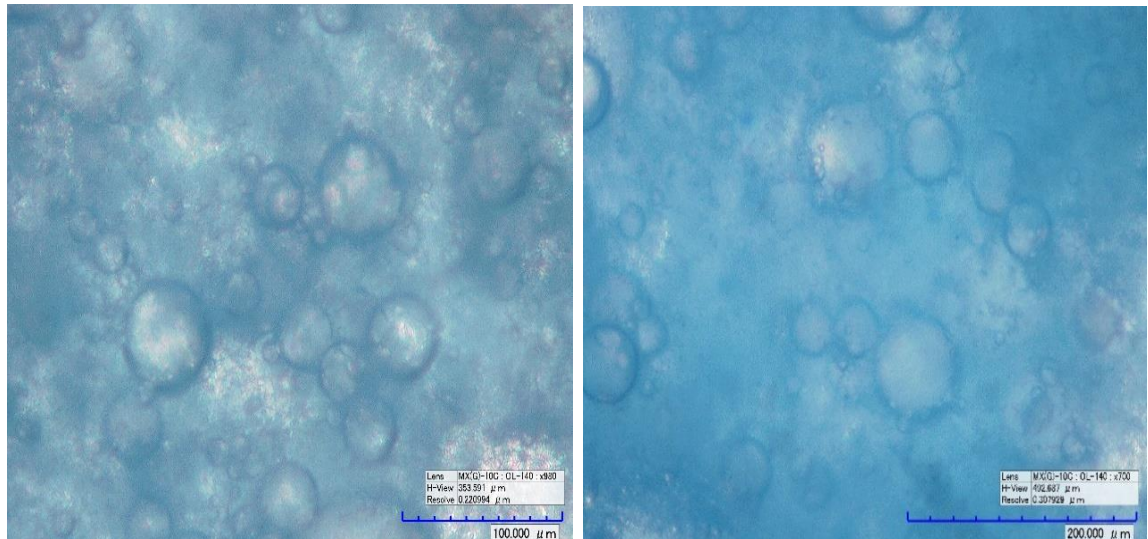


Para establecer la clasificación de la emulsión formulada según sus fases entre las de tipo O/W (aceite en agua) o W/O (agua en aceite), se añadió un colorante hidrófobo de color azul opaco que fue dispersado sobre una pequeña cantidad de la emulsión y luego se observa bajo el microscopio óptico qué fase se tiñó con el colorante. En la Figura 15 se puede ver que el colorante de baja polaridad encontró afinidad principalmente en la fase continua de la emulsión y no al interior de las micelas, indicando que la fase menos polar corresponde al poliestireno disuelto en d-limoneno.

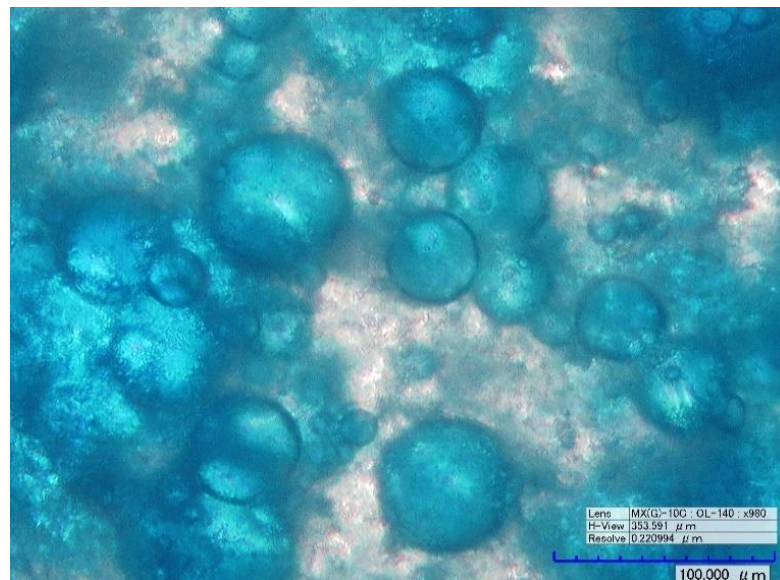
Por otro lado, se añadió a la emulsión un colorante hidrófilo azul brillante y se confirmó que se tiñó el interior de las micelas (Figura 16). Esto sugiere que la fase acuosa son las micelas de la emulsión, confirmando que el sistema se puede clasificar según sus fases como W/O.

Figura 15

Micrografías de la emulsión formulada usando un colorante hidrófobo.

**Figura 16**

Micrografía con magnificación 980X de la emulsión formulada usando un colorante hidrófilo de color azul brillante.



Al ser formulada como un sistema tipo W/O la emulsión tiene como ventajas una mayor estabilidad, una mayor capacidad de carga de ingredientes lipofílicos como el poliestireno y su solvente, ya que en su estructura inversa estos se dispersan en la fase continua oleosa. Como matriz polimérica en el material compuesto esta emulsión presentó también una mejor humectabilidad con las fibras OPEFB durante el proceso de conformado de las probetas en comparación con el EPS disuelto directamente sobre el d-limoneno, así como una disminución de su viscosidad que facilitó la mezcla del refuerzo con su matriz.

4.4 Propiedades mecánicas del material compuesto

El ensayo de resistencia a la compresión se aplicó a las probetas fabricadas a partir de fibras OPEFB modificadas de distinta granulometría (ver Figura 17) y arrojó las correspondientes curvas de esfuerzo-deformación que se compilaron en la Figura 18.

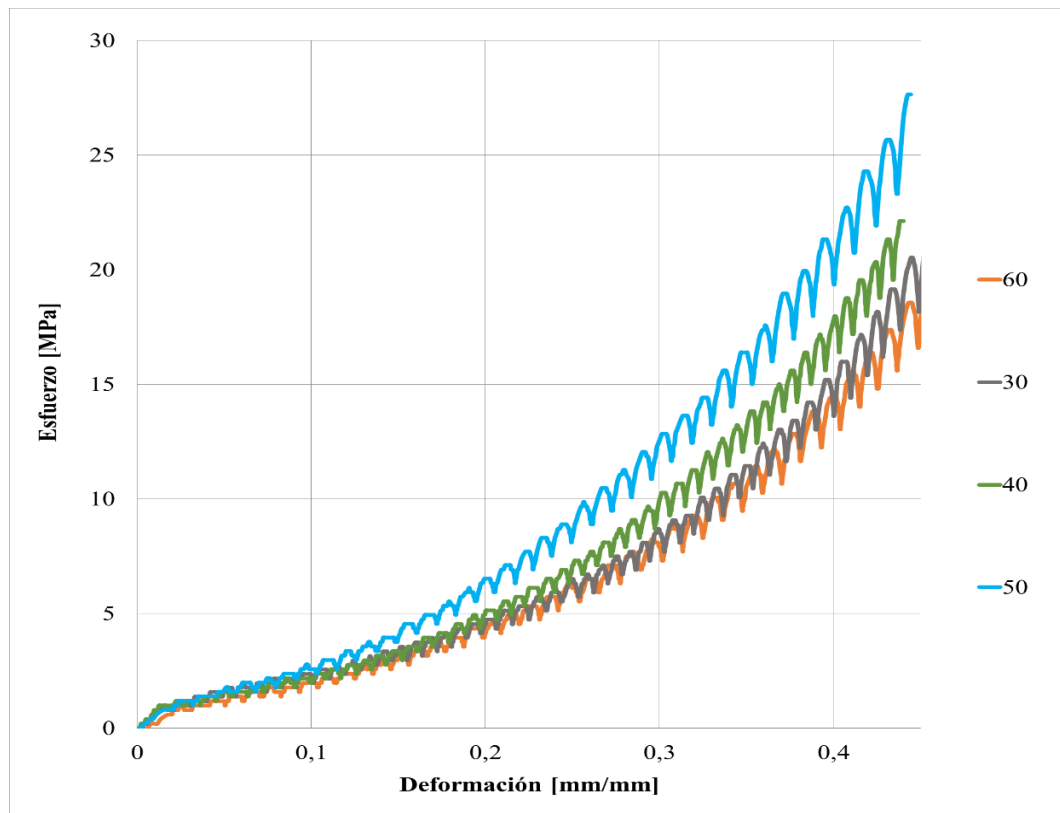
Figura 17

Esquema comparativo entre una probeta antes del ensayo de resistencia a la compresión y otra después de ser sometida al esfuerzo de compresión hasta su límite



Figura 18

Curva de esfuerzo-deformación para probetas de granulometría 30, 40, 50 y 60 Mesh



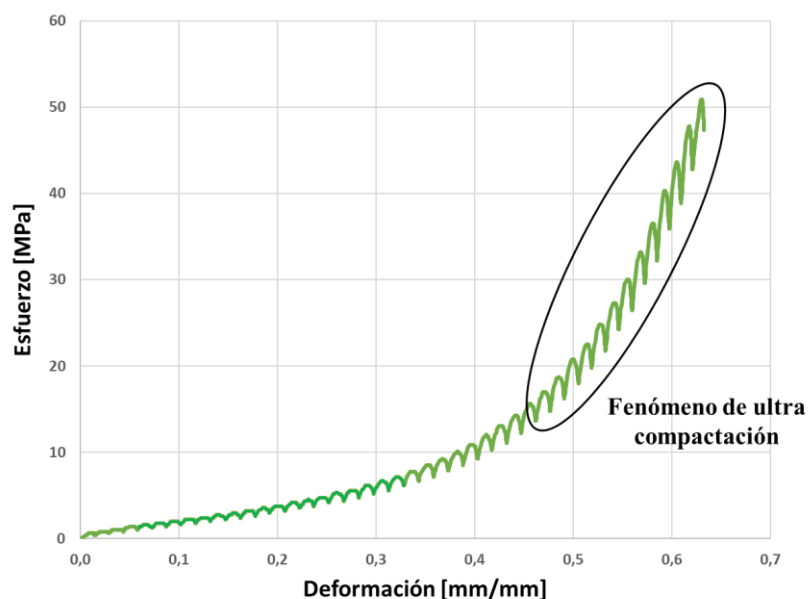
Se observa una amplia región de deformación plástica que aumenta con la carga y concluye con un fenómeno de ultra compactación de las fibras. Cabe mencionar que el comportamiento oscilatorio de todas las curvas se debe al modo de aplicación de la carga con prensa hidráulica durante el ensayo. Para este caso, las pruebas con cada probeta llegaron a su límite cuando la máquina de ensayos universales alcanzó la amplitud mínima de una pulgada entre la placa de la base y la prensa, es decir, correspondiente al 50% de la deformación de las probetas con una altura de dos pulgadas. Las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas no muestran las regiones típicas para permitir calcular propiedades como el límite elástico, el límite de proporcionalidad, la fluencia, el punto de ruptura, entre otras. Incluso el módulo de Young ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$) correspondiente a

la región elástica es arriesgado de establecer acorde con las especificaciones de la norma ASTM D695, pues la única región lineal que no supera el 2% inicial de la curva se debe probablemente a la acomodación de las fibras vegetales, facilitada por el movimiento de las cadenas poliméricas de la matriz de poliestireno y una cantidad residual del solvente d-limoneno.

En la Figura 19 se presenta una curva individual donde se puede elucidar más claramente el fenómeno de ultra compactación al final del esfuerzo de compresión a la que es sometida la probeta. En todos los casos las probetas no presentan ruptura y, tal como sucede con los materiales dúctiles, continúan deformándose hasta que la carga no se transfiere a la probeta, sino entre las dos placas de compresión.

Figura 19

Curva de esfuerzo-deformación para una probeta de granulometría 30 Mesh donde se señala la región correspondiente a la ultra compactación de las fibras vegetales del material



A partir de las anteriores curvas fue posible obtener:

- a) La resistencia a la compresión dada por el esfuerzo máximo (o carga máxima) de compresión soportado por la probeta.
- b) El porcentaje de compresión que se deduce del máximo valor de deformación por compresión obtenido del ensayo.
- c) La tenacidad calculada como el área completa en la curva de esfuerzo-deformación desde el origen hasta el último valor registrado, teniendo en cuenta que no hay punto de ruptura.

Todos los valores reportados para cada granulometría corresponden al promedio del triplicado de probetas ensayadas.

En la Tabla 3 se relacionan estas propiedades para probetas fabricadas a partir de fibras OPEFB con tratamiento químico.

Tabla 3

Relación de algunas propiedades a partir del ensayo de resistencia a la compresión aplicado a distintas granulometrías de fibras con tratamiento alcalino

Mesh	Resistencia a la compresión [MPa]	% Compresión	Tenacidad [J/mm ³]
30	21,96 ± 3,48	47,62 ± 2,34	1.02x10 ⁻² ± 0.056
40	25,11 ± 2,98	44,16 ± 1,57	2.83x10 ⁻² ± 0.078
50	27,64 ± 3,65	44,43 ± 3,87	6.24x10 ⁻² ± 0.067
60	18,46 ± 4,84	50,62 ± 2,89	1.19x10 ⁻² ± 0.082

Con el fin de comparar el desempeño de las probetas con fibras modificadas de su homólogo sin tratamiento alcalino en la Tabla 4 se relacionan algunas de sus propiedades.

Tabla 4

Relación de algunas propiedades a partir del ensayo de resistencia a la compresión aplicado a distintas granulometrías de fibras sin tratamiento alcalino

Mesh	Resistencia a la compresión [MPa]	% Compresión
30	9,08 ± 3,09	19,04 ± 4,89
40	14,46 ± 2,91	16,67 ± 16,65
50	16,91 ± 3,58	17,78 ± 17,76
60	5,73 ± 4,27	20,24 ± 20, 24

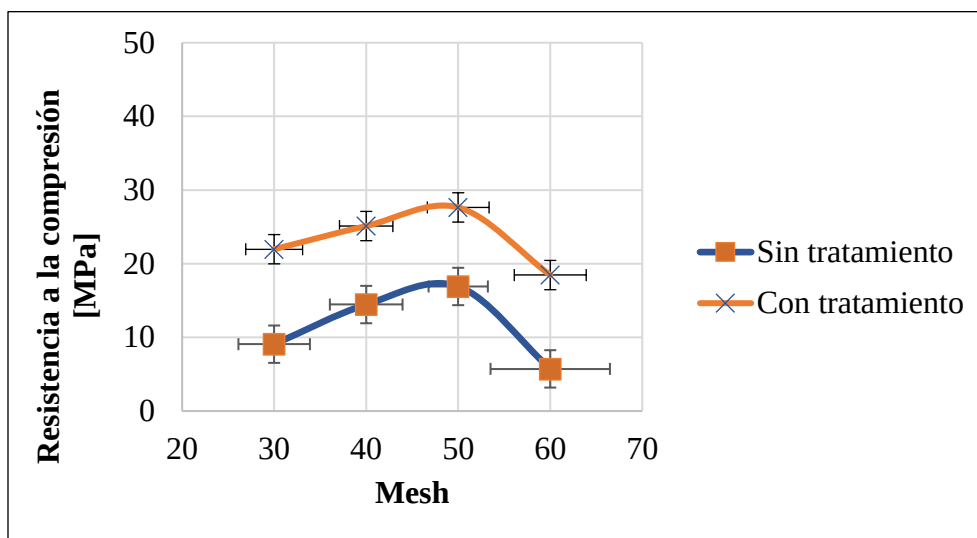
En la figura 20 se comparan los valores para la resistencia a la compresión entre ambos compósitos, siendo superiores en todas las granulometrías los provenientes de fibras modificadas. Se mantiene la correlación entre probetas con fibras del mismo número Mesh, siendo la de 50 la que presenta mayor valor (16,91 MPa) y la de 60 el menor (5,73 MPa) para probetas sin modificación y valores de 27,64 MPa y 18,46 MPa, respectivamente, para probetas con fibras modificadas. La mejora de las probetas tratadas se supera en todas las granulometrías (ver Figura 20) debido a una transferencia de esfuerzos más eficiente a causa de una mayor interacción entre las fibras y su matriz por una adhesión química más fuerte y un mayor anclaje mecánico con las cavidades expuestas en la superficie de las fibras después del tratamiento alcalino.

Un mejor desempeño en fibras de 40 y 50 Mesh se debe probablemente a que el tamaño de la fibra OPEFB entre 0.3 y 0.4 mm genera menor porosidad y espacios entre los

entrecruzamientos. Por su parte, las probetas con fibras de 60 Mesh presentan el valor más bajo por la posible congestión o agrupamiento de las fibras cortas que altera la unión fibra-matriz produciendo vacíos. Durante el proceso de conformado de estas probetas la reacomodación de la mezcla de fibra y emulsión fue diferente debido a este agrupamiento y probablemente la presión aplicada con el émbolo del molde durante el calentamiento no fue suficiente para eliminar dichos vacíos que pudieron aumentarse por la evaporación del d-limoneno y el agua.

Figura 20

Relación entre los valores obtenidos para la resistencia a la compresión de probetas de distinta granulometría con fibras de OPEFB modificadas y sin modificar.

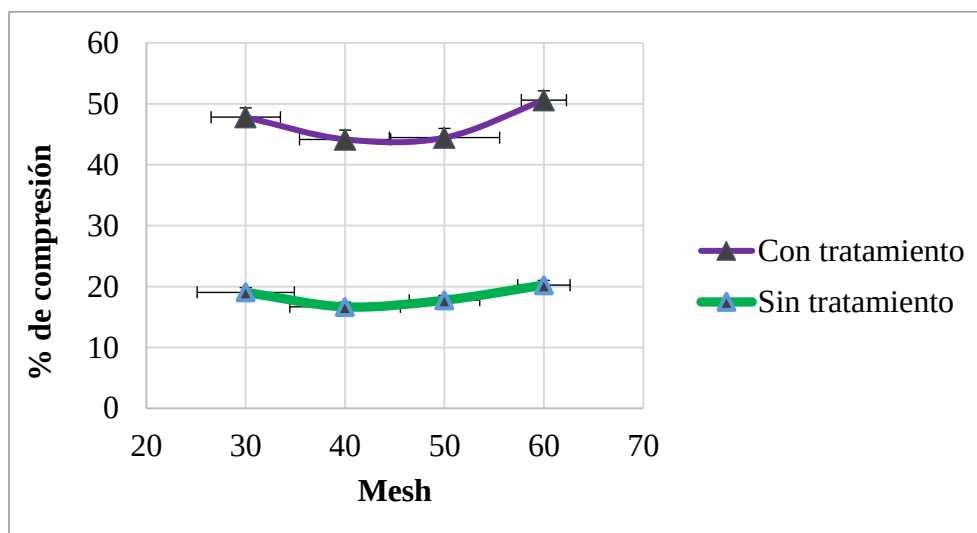


En la Figura 21 se establecen las curvas para el porcentaje de compresión y se tiene que el tratamiento alcalino también confirió un mejor desempeño en todas las referencias de tamaño, siendo las de 60 Mesh las que presentaron mayor % de compresión (50.6%) y las de 40 Mesh las de menor valor (44.16%). El porcentaje de compresión está probablemente relacionado con el tamaño de las fibras y la porosidad al interior de probetas de distinta granulometría, que afecta la

transferencia del esfuerzo aplicado. En el caso de las probetas de 60 Mesh una mayor deformación por compresión se relaciona con las particularidades discutidas anteriormente, pues una mayor cantidad de vacíos en su interior facilita la acomodación de las fibras.

Figura 21

Relación entre los valores obtenidos para el % de compresión de probetas de distinta granulometría con fibras de OPEFB modificadas y sin modificar.



Recordando, las propiedades de los compósitos dependen de la matriz, de las fibras y de su unión interfacial. La adhesión entre ambos juega un papel importante, ya que la transferencia de tensión entre la matriz y las fibras determina la eficiencia del refuerzo, y su aumento es conferido mediante tratamientos químicos a las fibras. Por tanto, para un compósito EPS-OPEFB sin tratamiento químico de sus fibras es de esperar una interacción baja entre sus fases y unas propiedades inferiores a las del material compuesto con las fibras tratadas.

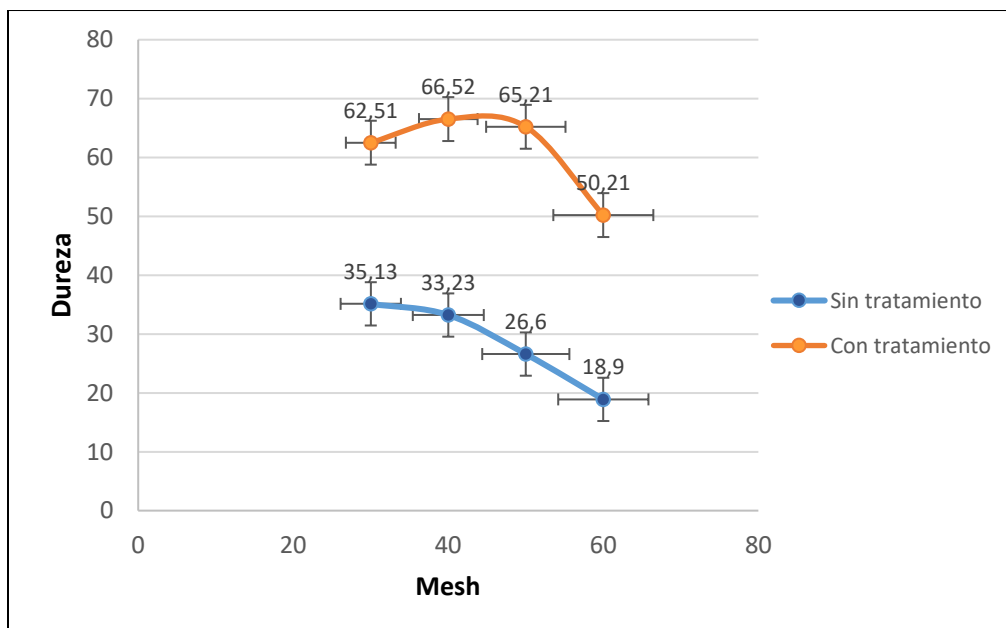
El desempeño superior de las probetas fabricadas a partir de fibras tratadas se debe a que se crearon mejores condiciones de interfaz con su matriz polimérica haciéndolas más compatibles. Por un

lado, una disminución de la hidrofiliidad de las fibras tratadas permite que aumente la unión química con el poliestireno de baja polaridad. Por el otro, el aumento del área superficial con menos impurezas y con una mayor rugosidad facilita la posibilidad de que exista también un anclaje mecánico en estas regiones. Esto hace que la separación entre ambas fases sea más difícil y la transferencia de esfuerzos, cuando la probeta es sometida a cargas, sea más eficiente si se compara con el desempeño de las fibras crudas.

De manera complementaria se realizó un ensayo de dureza bajo la norma ASTM 2240 donde se empleó un durómetro Shore tipo D con el objeto de evaluar la resistencia que oponían los aglomerados al ser penetrados por otro material más duro. Las probetas con tratamiento químico presentan valores mayores gracias a los cambios en las condiciones de interfaz, permitiendo que las nuevas uniones químicas y mecánicas disminuyan los espacios entre fibras y la porosidad del material compuesto.

Figura 22

Dureza estimada para probetas con tratamiento y sin tratamiento alcalino.



4.5 Análisis estructural del material compuesto

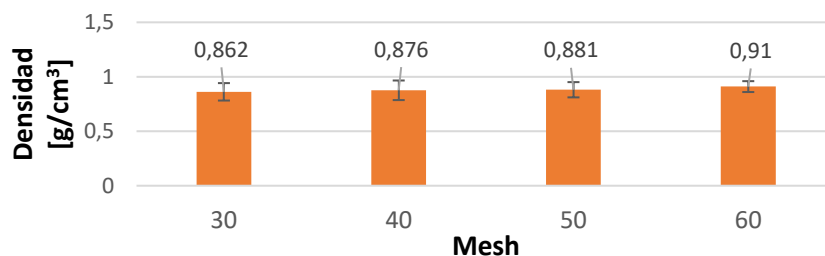
Es imperativo resaltar que las propiedades mecánicas de las fibras naturales dependen de las complejas relaciones entre las variables externas y los parámetros estructurales intrínsecos que se encuentran a nivel molecular, macromolecular y microscópico (Hassan *et al.*, 2016).

La aplicación del tratamiento alcalino modificó la superficie de las fibras, generando grupos funcionales que promovieron una mejor adhesión con la matriz. Esto pudo reducir el deslizamiento y la separación entre las fibras y la matriz, mejorando la transferencia de carga y, en consecuencia, las propiedades mecánicas del material compuesto (Torres & Aragon, 2006). Por su parte, la matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición y evita la propagación de grietas en las fibras hacia todo el compósito.

Análogamente, se midió la densidad a probetas del material compuesto con distinta granulometría cuyos resultados se recopilan en la Figura 23. Teniendo en cuenta que la densidad del PS se encuentra entre 1.04 y 1.07 g/cm³ y la densidad de las fibras OPEFB varía entre 0.5 y 0.9 g/cm³, se puede concluir que la densidad del material compuesto está más cercana a la de las fibras. Lo anterior tiene sentido si se tiene en cuenta que este es el componente mayoritario del material (80% aproximadamente) y que las propiedades mecánicas de las probetas ensayadas se deben principalmente al desempeño de las fibras OPEFB.

Figura 23

Densidad de probetas de distinta granulometría con fibras tratadas



En la micrografía de la Figura 24 se observa una fibra OPEFB sin tratar, recubierta parcialmente por su matriz polimérica y en la Figura 25 se observan las fibras tratadas incorporadas totalmente en su matriz.

Figura 24

Micrografía SEM-ETD de una fibra recubierta parcialmente por su matriz polimérica.

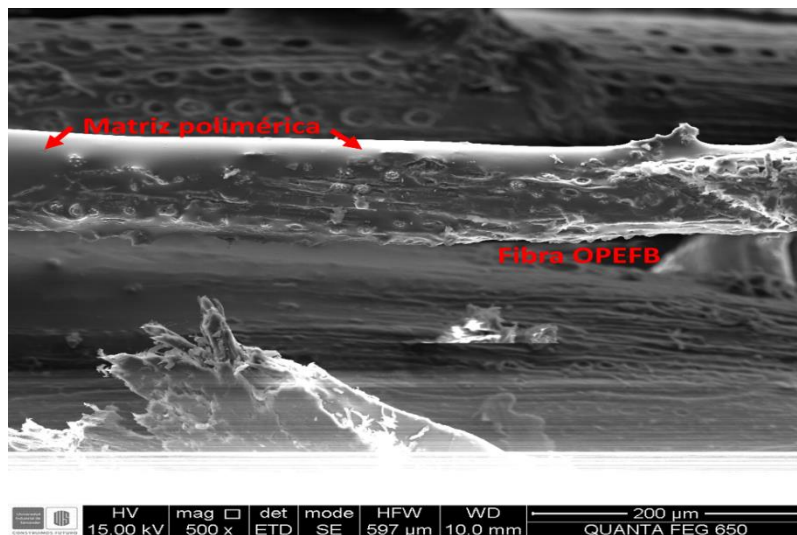
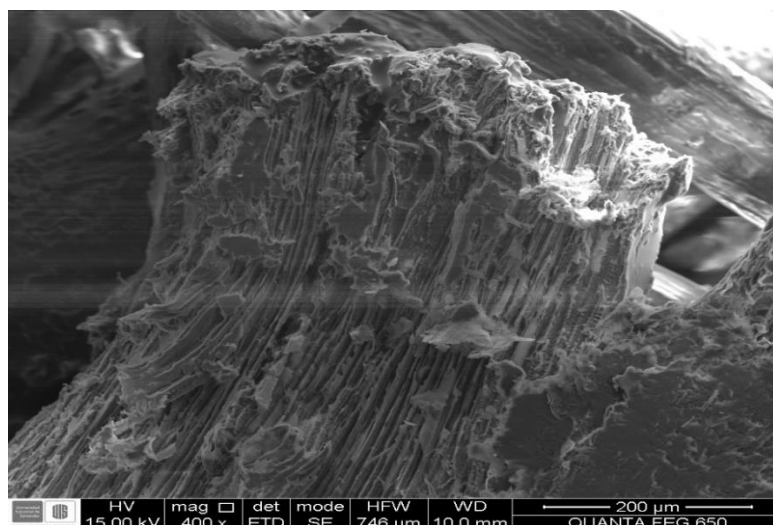


Figura 25

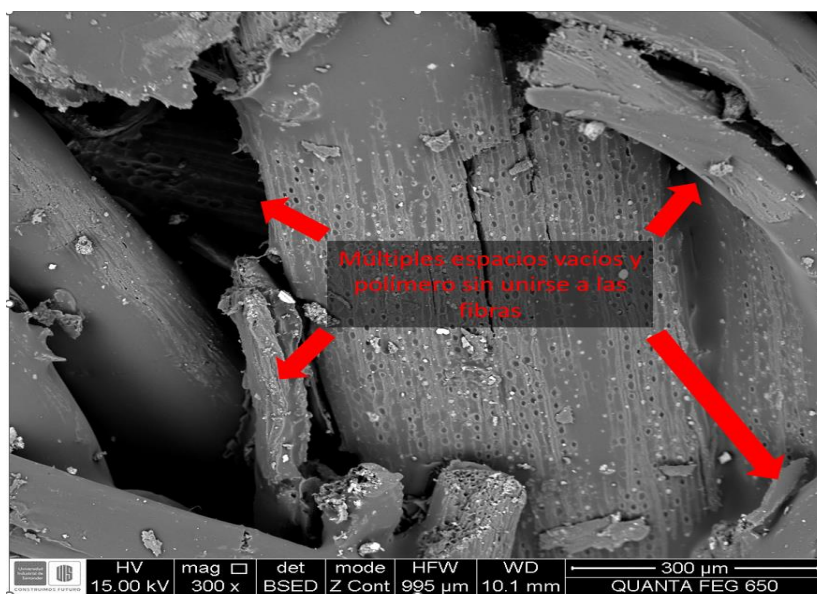
Micrografía SEM-ETD de una muestra del material compuesto donde se ven las fibras embebidas dentro de su matriz.



Durante los ensayos preliminares con probetas de menor tamaño fabricadas para evaluar la composición óptima del material se examinó esta con una composición 1:1 de fibra y emulsión. Como se ve en la micrografía de la Figura 26 hay muchos espacios entre fibras y polímero que no se unió a ellas. Macroscópicamente esto se traduce en una probeta con fibras sueltas y una pésima adhesión interfacial por falta de una mayor cantidad de matriz polimérica.

Figura 26

Micrografía SEM-BSED de una probeta con composición 1:1 de fibra-emulsión

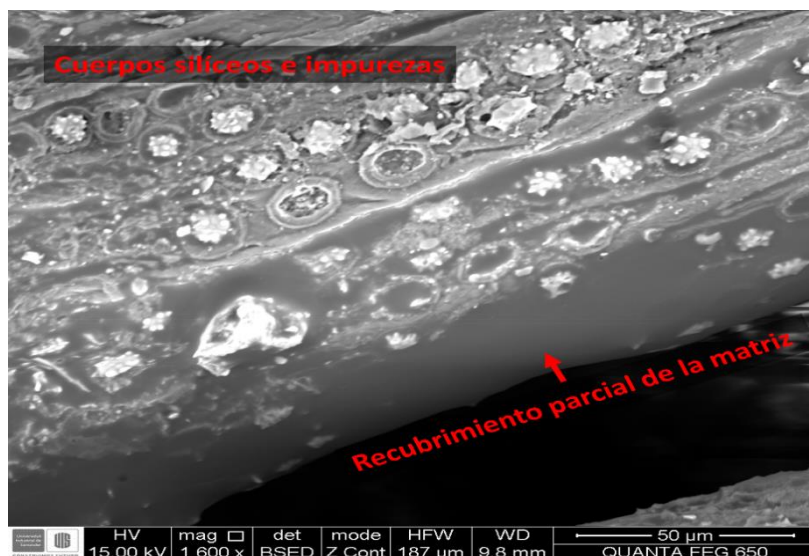


Las fibras OPEFB sin tratamiento químico presenta cuerpos silíceos, ceras e impurezas discutidas en el apartado 4.1. Cuando estas fibras sin tratar hacen parte de un material compuesto es de esperar que se afecte la interacción entre ambas fases. En la Figura 27 se puede ver que las zonas donde se presenta ocupación de los poros por la sílice y baja rugosidad en la superficie de la fibra tienen como consecuencia una mínima cantidad de polímero recubriendo el área y seguramente hay una mínima adhesión entre ambas fases. Esto supone una afectación en las

propiedades mecánicas del material, tal como se concluyó en la prueba de resistencia a la compresión de las fibras sin tratamiento químico. Cabe destacar que las fibras tratadas aumentan el área superficial expuesta con mejores condiciones de interfaz para adherirse a la matriz.

Figura 27

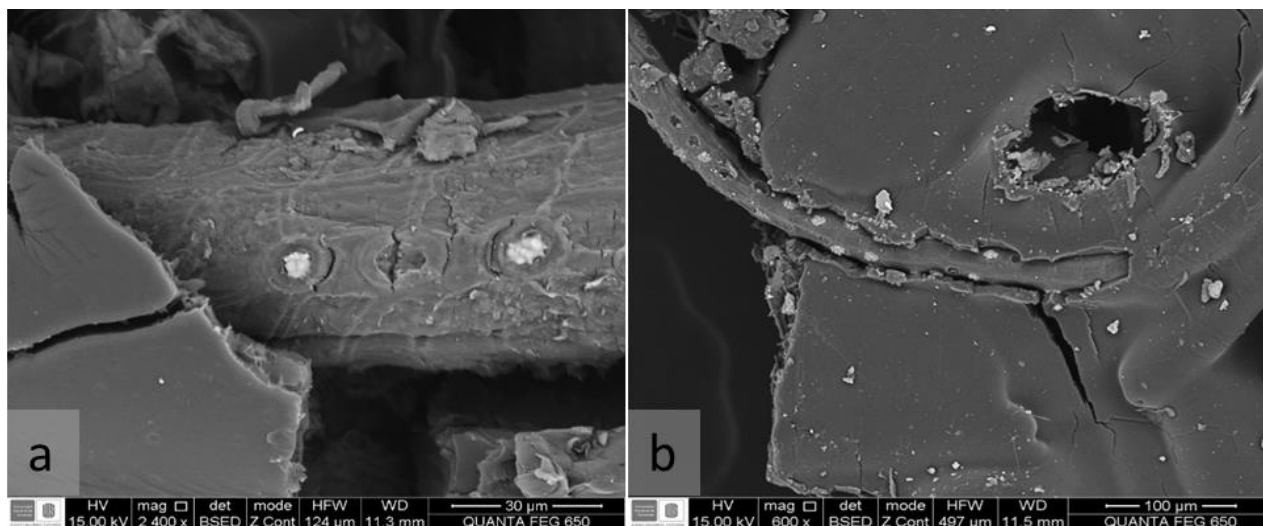
Micrografía SEM-ETD de una fibra OPEFB sin tratar y el efecto en el recubrimiento polimérico



En las micrografías de la Figura 28 se observa la ruptura de algunas fibras sin tratar de su matriz polimérica. Nótese las impurezas y cuerpos silíceos presentes en la superficie. La extracción de las fibras con una mínima cantidad de polímero adherido y la salida de una gran extensión de esta de su matriz indica una débil interacción interfacial entre ambos.

Figura 28

Micrografías SEM-BSED de una probeta después del ensayo de resistencia a la compresión. En la 24(a) una fibra sale de su matriz y en la 24(b) la matriz se rompe y la fibra queda expuesta.



Por su parte, las propiedades anisótropas del refuerzo, debido a que la orientación de las fibras no hizo parte del proceso de moldeo, hacen que la transferencia del esfuerzo entre las fibras no sea muy eficiente y homogéneo, ocasionando una relajación local y un posible deshilachamiento cuando la probeta está sometida a carga. Esto hace que los extremos de las fibras rotas salieran de la matriz reduciendo la robustez y la resistencia a la fractura de la probeta. De igual forma, incorporar mezclas de material retenido en distintas mallas puede traer mejoras en cuanto a la resistencia mecánica medida a compresión (Torres & Aragon, 2006).

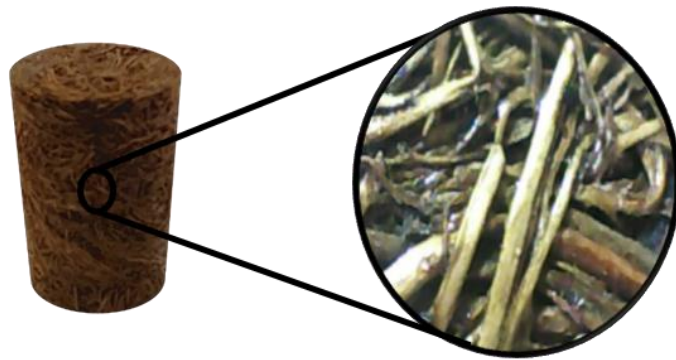
Las aplicaciones ingenieriles para el material desarrollado (ver Figura 29) se orientan a la búsqueda de propiedades similares a la madera y sus aglomerados debido a su origen lignocelulósico, su apariencia y las necesidades cotidianas que puede resolver un material económico y maquinable. Para comparar el material fabricado con respecto a la madera estructural (Suirez, 2009) sólo es equiparable al Kiri (16.57 MPa), a la Gravilea (26.38 MPa) y al pino elioti (29.42 MPa). Presenta también una resistencia a la compresión superior al yeso (2.58 MPa), yeso

con adición de caucho (2.98 MPa), yeso con adición de corcho (2.79 MPa), yeso con PET añadido (3.24 MPa) y yeso con adición de celulosa (3.50 MPa), según una investigación realizada por Delgado (2016).

De manera similar, supera los valores del MDF (2.31 MPa) y un tablero laminado de poliuretano reciclado (2.09 MPa) según el reporte de Guacapiña (2018). Con respecto a materiales compuestos experimentales con otras fibras y matrices presenta mejor apariencia y una resistencia a la compresión superior o equiparable a las investigaciones de Centeno *et al.* (2015); Niño, D. & Sánchez, D. (2012); Arciniegas, M. & Delgado, W. (2019) y Calderón, H. & Neira, P. (2018), pero se requiere realizar ensayos de tensión y tracción para hacer una comparación más exhaustiva con materiales análogos.

Figura 29

Imagen de una probeta del material compuesto fabricado y una vista con microscopio óptico



5. Conclusiones

El análisis morfológico de las fibras OPEFB crudas confirmó la presencia de cuerpos de sílice, ceras y otras impurezas que fueron necesarios remover con un tratamiento alcalino al 5% de NaOH. Las micrografías analizadas mediante SEM con distintos detectores mostraron que después del tratamiento las fibras presentaron una mayor exposición del área superficial con una remoción considerable de cuerpos silíceos de los poros y un aumento en la rugosidad. Es fundamental estudiar las condiciones de aplicación del tratamiento químico porque una solución muy concentrada o una inmersión prolongada puede romper los enlaces químicos celulósicos y degradar no sólo la superficie sino también la estructura completa de las fibras. Esto tendría como consecuencia indeseada una transferencia de carga deficiente entre las fibras, afectando considerablemente el desempeño del material compuesto en cuanto a propiedades mecánicas.

Los efectos del tratamiento químico aplicado a la superficie de las fibras se estudiaron mediante FTIR y fue posible confirmar varios cambios en regiones típicas asignadas a materiales de origen lignocelulósico, sugiriendo que se generó una disminución en la polaridad de las fibras, haciéndolas potencialmente más compatibles con la matriz polimérica en el material compuesto.

La emulsión formulada a partir de la disolución del EPS en un volumen de d-limoneno es un sistema tipo W/O con tamaño de micelas y apariencia típicas de las macroemulsiones. Presenta como ventajas una mayor estabilidad, una mayor capacidad de carga de ingredientes lipofílicos como el poliestireno y su solvente, ya que en su estructura inversa estos se dispersan en la fase continua oleosa. Como matriz polimérica en el material compuesto esta emulsión presentó también una mejor humectabilidad con las fibras OPEFB durante el proceso de conformado de las probetas

en comparación con el EPS disuelto directamente sobre el d-limoneno, así como una disminución de su viscosidad que facilitó la mezcla del refuerzo con su matriz.

Fue posible desarrollar un material compuesto a partir de fibras OPEFB modificadas con una composición en relación 1:3 de fibra y emulsión. La adhesión interfacial entre matriz y refuerzo fue mejorada gracias al tratamiento alcalino al 5% de NaOH a las fibras. El desempeño superior de las probetas fabricadas a partir de fibras tratadas se debe a que se crearon mejores condiciones de interfaz con su matriz polimérica haciéndolas más compatibles. Por un lado, una disminución de la hidrofiliidad de las fibras tratadas permite que aumente la unión química con el poliestireno de baja polaridad. Por el otro, el aumento del área superficial con menos impurezas y con una mayor rugosidad facilita la posibilidad de que exista también un anclaje mecánico en estas regiones. Esto hace que la separación entre ambas fases sea más difícil y la transferencia de esfuerzos, cuando la probeta es sometida a cargas, sea más eficiente si se compara con el desempeño de las fibras crudas.

Con esta investigación se demostró que la modificación de las condiciones de interfaz en los materiales compuestos reforzados con fibras naturales cumple un papel fundamental en el desempeño de éste y sus posibles aplicaciones. Un tratamiento químico adecuado para las fibras de refuerzo con su correspondiente matriz mejora significativamente las propiedades morfológicas, composicionales y mecánicas de las probetas estudiadas.

6. Recomendaciones

Diseñar un estudio más amplio de las propiedades mecánicas del material compuesto de la presente investigación permitirá entender con mayor profundidad su microestructura y posibilidades futuras como un compuesto comercial.

La aplicación de otros tratamientos químicos a las fibras OPEFB podría mejorar las condiciones de interfaz de diferentes maneras y obtenerse un material compuesto con otras características.

La mezcla de fibras OPEFB de distinta granulometría en una misma probeta puede compensar efectos indeseados y mejorar las propiedades mecánicas del material. La incorporación de distintos tipos de fibras y cascarillas en un mismo material compuesto con un diseño adecuado también puede abrir paso a nuevos materiales con propiedades complementarias.

Estudiar nuevas matrices poliméricas o resinas reforzadas con fibras OPEFB modificadas posiblemente proveerán mejores propiedades mecánicas, teniendo en cuenta que el poliestireno suele tener un desempeño inferior a otros polímeros comunes.

Realizar un diseño experimental en cuyo proceso de fabricación se tenga en cuenta la orientación de las fibras traerá una respuesta diferente del material frente a diferentes ensayos de esfuerzo-deformación.

Referencias Bibliográficas

Adelodun, A. A., Adeniyi, A. G., Ighalo, J. O., Onifade, D. V., & Arowoyele, L. T. (2020). Thermochemical conversion of oil palm Fiber-LDPE hybrid waste into biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(6), 1313-1323. <https://doi.org/10.1002/bbb.2130>

Ahmad, M. N., Ishak, M. R., Taha, M. M., Mustapha, F., & Leman, Z. (2023). Mechanical, thermal and physical characteristics of oil palm (*Elaeis Guineensis*) fiber reinforced thermoplastic composites for FDM-Type 3D printer. *Polymer Testing*, 120, 107972. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107972>

Alawar, A., Hamed, A. M., & Al-Kaabi, K. (2009). Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 601-606. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.018>

Arciniegas, M. & Delgado, W. (2019). Caracterización mecánica de un material compuesto por fibras de coco (mesocarpio) en matriz biodegradable. Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

Ashik, K. P., & Sharma, R. S. (2015). A review on mechanical properties of natural fiber reinforced hybrid polymer composites. *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, 3(05), 420. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2015.35044>

Asyraf, M. R. M., Nurazzi, N. M., Norrrahim, M. N. F., Hazrati, K. Z., Ghani, A., Sabaruddin, F. A., ... & Razman, M. R. (2023). Thermal properties of oil palm lignocellulosic fibre reinforced polymer composites: a comprehensive review on thermogravimetry analysis. *Cellulose*, 30(5), 2753-2790. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05080-4>

Balart, R., Montanes, N., Dominici, F., Boronat, T., & Torres-Giner, S. (2020). Environmentally friendly polymers and polymer composites. *Materials*, 13(21), 4892.

Barbero, E. J. (2018). *Introduction to Composite Materials Design* (3rd ed.). CRC Press

Ben Amor, I., Rekik, H., Kaddami, H., Raihane, M., Arous, M., & Kallel, A. (2010). Effect of palm tree fiber orientation on electrical properties of palm tree fiber-reinforced polyester composites. *Journal of composite materials*, 44(13), 1553-1568.
<https://doi.org/10.1177/0021998309353961>

Calderón, H. & Neira, P. (2018). Caracterización mecánica de un material compuesto a partir de la cáscara de la macadamia y un agente aglomerante, acetato de polivinilo (biodegradable). Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.

Castro, N. (2020). “No la llames africana”. Procesos de (des) valorización en torno a la palma de aceite en Marialabaja (Colombia): Tesis de doctorado en Ciencias Sociales UNGS-IDES. *Prácticas de Oficio. Investigación y reflexión en Ciencias Sociales*, (25), 2-2.

Centeno, P. E. M., Robayo, R. A., Diaz, J. E., Delvasto, S., & Monzó, J. M. (2015). Aplicación de ceniza de cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales (application of rice husk ash obtained from agro-industrial process for the manufacture of nonstructural concrete blocks). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 285-294.

Chaiwong, W., Samoh, N., Eksomtrame, T., & Kaewtatip, K. (2019). Surface-treated oil palm empty fruit bunch fiber improved tensile strength and water resistance of wheat gluten-based bioplastic. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107331.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107331>

Chen, C., Chen, G., Li, X., Guo, H., & Wang, G. (2017). The influence of chemical treatment on the mechanical properties of windmill palm fiber. *Cellulose*, 24, 1611-1620.
<https://doi.org/10.1007/s10570-017-1205-1>

Chichane, A., Boujmal, R., & El Barkany, a. (2023). Bio-composites and bio-hybrid composites reinforced with natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3471-3479.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.132>

Dávila, J., Galeas, S., Guerrero, V., Pontón, P. (2011). Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales.

Delgado, D. (2016). Evaluación comparativa de las propiedades mecánicas entre el yeso y el yeso adicionado con materiales reciclados según la norma UNE-EN 13279-2 para uso en la fabricación de placas de yeso. Universidad Andina del Cusco.

https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/699/Dina_Tesis_bachiller_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

El Oudiani, A., Chaabouni, Y., Msahli, S., & Sakli, F. (2011). Crystal transition from cellulose I to cellulose II in NaOH treated Agave americana L. fibre. *Carbohydrate Polymers*, 86(3), 1221-1229. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.037>

Faizi, M. K., Shahrman, A. B., Majid, M. A., Shamsul, B. M. T., Ng, Y. G., Basah, S. N., ... & Hazry, D. (2017). An overview of the Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) potential as reinforcing fibre in polymer composite for energy absorption applications. In *MATEC web of conferences* (Vol. 90, p. 01064). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179001064>

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*, 37(11), 1552-1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

Fedepalma (30 de septiembre de 2019). Presentación de desempeño: La palmicultura en Colombia. Recuperado el 2 de febrero de 2020 de:

<http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/presentacion-desempeno-palmicultura-colombia.pdf>

García, M. T., Gracia, I., Duque, G., de Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2009). Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste management*, 29(6), 1814-1818. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.01.001>

Gil-Jasso, N. D., Segura-González, M. A., Soriano-Giles, G., Neri-Hipolito, J., López, N., Mas-Hernández, E., ... & Ballesteros-Rivas, M. F. (2019). Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. *Fuel*, 239, 611-616. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.055>

González-Campo, C. H., Ico-Brath, D., & Murillo-Vargas, G. (2022). Integración de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para el cumplimiento de la agenda 2030 en las universidades públicas colombianas. *Formación universitaria*, 15(2), 53-60. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062022000200053>

Guacapiña, A. (2018). Determinación del tamaño de partícula para elaboración de tableros sintéticos con espuma de poliuretano reciclado. Tesis de pregrado en Ingeniería Química. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/16896/1/T-UCE-0017-IQU-015.pdf>

Gutiérrez, C., García, M. T., Gracia, I., de Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2013). The selective dissolution technique as initial step for polystyrene recycling. *Waste and Biomass Valorization*, 4, 29-36. <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9131-9>

Gutiérrez, C., Gutiérrez, J. & Sánchez, M. (2020). Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption.

Revista Facultad De Ingeniería, 29(54), e10489.

<http://dx.doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10489>

Hassan, A., Salema, A. A., Ani, F. N., & Bakar, A. A. (2010). A review on oil palm empty fruit bunch fiber-reinforced polymer composite materials. *Polymer Composites*, 31(12), 2079-2101. <https://doi.org/10.1002/pc.21006>

Hattori, K., Naito, S., Yamauchi, K., Nakatani, H., Yoshida, T., Saito, S., ... & Miyakoshi, T. (2008). Solubilization of polystyrene into monoterpenes. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 27(1), 35-39. <https://doi.org/10.1002/adv.20115>

Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S. Y., Choi, J., & Hong, J. (2020). Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Scientific reports*, 10(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64464-9>

Izani, M. N., Paridah, M. T., Anwar, U. M. K., Nor, M. M., & H'ng, P. S. (2013). Effects of fiber treatment on morphology, tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1251-1257. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.027>

Jawaid, M., Khalil, H. A., & Bakar, A. A. (2010). Mechanical performance of oil palm empty fruit bunches/jute fibres reinforced epoxy hybrid composites. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), 7944-7949. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.005>

Kale, S. N., & Deore, S. L. (2017). Emulsion micro emulsion and nano emulsion: a review. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 8(1), 39. <https://doi.org/10.5530/srp.2017.1.8>

Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., & Kumar, N. (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1616-1621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.851>

Keya, K. N., Kona, N. A., Koly, F. A., Maraz, K. M., Islam, M. N., & Khan, R. A. (2019). Natural fiber reinforced polymer composites: history, types, advantages and applications. *Materials Engineering Research*, 1(2), 69-85. <https://doi.org/10.25082/MER.2019.02.006>

Khalil, H. A., & Ismail, H. (2000). Effect of acetylation and coupling agent treatments upon biological degradation of plant fibre reinforced polyester composites. *Polymer Testing*, 20(1), 65-75. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(99\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(99)00080-X)

Khalil, H. P. S. A., Bhat, I. U. H., & Jawaidd, M. (2019). Cellulosic Fibres: Structure, Properties and Applications. In *Natural Fiber Reinforced Polymer Composites* (pp. 17-50). Springer. <https://doi.org/10.1177/0731684412458>

Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L., & Vigneshkumar, N. (2020). An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. *Materials today: proceedings*, 27, 2828-2834. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.011>

Kumar, S., Manna, A., & Dang, R. (2022). A review on applications of natural Fiber-Reinforced composites (NFRCs). *Materials Today: Proceedings*, 50, 1632-1636. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.131>

Kwon, B. G., Koizumi, K., Chung, S. Y., Koder, Y., Kim, J. O., & Saido, K. (2015). Global styrene oligomers monitoring as new chemical contamination from polystyrene plastic marine pollution. *Journal of hazardous materials*, 300(3), 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.07.039>

Li, X., Tabil, L. G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25-33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>

Lalit, R., Mayank, P., & Ankur, K. (2018). Natural fibers and biopolymers characterization: A future potential composite material. *Journal of Mechanical Engineering*, 68(1), 33-50. <https://doi.org/10.2478/scjme-2018-0004>

Latip, N. A., Sofian, A. H., Ali, M. F., Ismail, S. N., & Idris, D. M. N. D. (2019). Structural and morphological studies on alkaline pre-treatment of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fiber for composite production. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1105-1111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.529>

Law, K. N., Wan Daud, W. R., & Ghazali, A. (2007). Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *BioResources*, 2(3), 351-362.

Lee, C. H., Khalina, A., & Lee, S. H. (2021). Importance of interfacial adhesion condition on characterization of plant-fiber-reinforced polymer composites: A review. *Polymers*, 13(3), 438. <https://doi.org/10.1177/0892705719844546>

Lotfi, A., Li, H., Dao, D. V., & Prusty, G. (2021). Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing, and machinability. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(2), 238-284. <https://doi.org/10.1177/0892705719844546>

Machaka, M., Basha, H., Abou Chakra, H., & Elkordi, A. (2014). Alkali treatment of fan palm natural fibers for use in fiber reinforced concrete. *European scientific journal*, 10(12). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.132>

Mangalara, S. C. H., & Varughese, S. (2016). Green recycling approach to obtain nano- and microparticles from expanded polystyrene waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 6095-6100. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01493>

Mann, G. S., Singh, L. P., Kumar, P., & Singh, S. (2020). Green composites: A review of processing technologies and recent applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(8), 1145-1171. <https://doi.org/10.1177/0892705718816354>

Metalinspec (29 de enero de 2020). ¿Por qué se realizan pruebas de compresión?. Blog de Metalinspec. <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/por-que-realizar-pruebas-de-compresion>

Mohammed, L., Ansari, M. N., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 15 (1), 1-15. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>

Momoh, E. O., & Osofero, A. I. (2020). Recent developments in the application of oil palm fibers in cement composites. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14, 94-108. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0576-9>

Monteiro, S. N., Satyanarayana, K. G., Ferreira, A. S., Nascimento, D. C. O., Lopes, F. P. D., Silva, I. L. A., ... & Portela, T. G. (2010). Selection of high strength natural fibers. *Matéria* (Rio de Janeiro), 15, 488-505. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.961>

Navaneethakrishnan, G., Karthikeyan, T., Saravanan, S., Selvam, V., Parkunam, N., Sathishkumar, G., & Jayakrishnan, S. (2020). Structural analysis of natural fiber reinforced polymer matrix composite. *Materials today: proceedings*, 21, 7-9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.295>

Niño, D. & Sánchez, D. (2012). Obtención y caracterización físicomecánica de un material compuesto termoplástico reforzado con fibras de coco troceadas. Tesis de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander.

Noah, A. S. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB)–Alternative Fibre Source for Papermaking. In *Elaeis guineensis*. London, United Kingdom IntechOpen.

Omar, F. N., Mohammed, M. A. P., & Baharuddin, A. S. (2014). Microstructure Modelling of Silica Bodies from Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) Fibres. *BioResources*, 9(1).

Or, K. H., Putra, A., & Selamat, M. Z. (2017). Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber. *Applied acoustics*, 119, 9-16.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.12.002>

Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (15 de marzo de 2019). Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso.
<https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>

Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (15 de marzo de 2019).

Pineda, H. (2001). Análisis de esfuerzos en materiales compuestos. Instituto Politécnico Nacional.

Prabhu, L., Krishnaraj, V., Sathish, S., GokulKumar, S., & Karthi, N. (2019). Study of mechanical and morphological properties of jute-tea leaf fiber reinforced hybrid composites: Effect of glass fiber hybridization. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.132>

Radzi, A. M., Sapuan, S. M., Jawaid, M., & Mansor, M. R. (2019). Effect of alkaline treatment on mechanical, physical and thermal properties of roselle/sugar palm fiber reinforced

thermoplastic polyurethane hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 20, 847-855.
<https://doi.org/10.1007/s12221-019-1061-8>

Radzi, A. N. A. M., & Jamari, S. S. (2020). Structural Studies of Surface Modifeid Oil Palm Empty Fruit Bunch with Alkaline Pre-Treatment as Potential Filler for the Green Composite. *Jurnal Tribologi*, 26, 75-83.

Rajeshkumar, G., Seshadri, S. A., Ramakrishnan, S., Sanjay, M. R., Siengchin, S., & Nagaraja, K. C. (2021). A comprehensive review on natural fiber/nano-clay reinforced hybrid polymeric composites: *Materials and technologies*. *Polymer Composites*, 42(8), 3687-3701.
<https://doi.org/10.1002/pc.26110>

Ramlee, N. A., Naveen, J., & Jawaidd, M. (2021). Potential of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) and sugarcane bagasse fibers for thermal insulation application—A review. *Construction and Building Materials*, 271, 121519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121519>

Rayung, M., Ibrahim, N. A., Zainuddin, N., Saad, W. Z., Razak, N. I. A., & Chieng, B. W. (2014). The effect of fiber bleaching treatment on the properties of poly (lactic acid)/oil palm empty fruit bunch fiber composites. *International journal of molecular sciences*, 15(8), 14728-14742. <https://doi.org/10.3390/ijms150814728>

Salaman, A. J. (2012). Tensile and impact properties of polystyrene matrix composites reinforced by palm natural fibers and carbon fibers. *Academic Research International*, 3(2), 114.

Schmidt, P. N. S., Cioffi, M. O. H., Voorwald, H. J. C., & Silveira, J. L. (2011). Flexural test on recycled polystyrene. *Procedia Engineering*, 10, 930-935.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.153>

Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., & Kochubabu, M. (2011). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. *Industrial Crops and products*, 33(1), 7-22.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>

Singha, A. S., Rana, R. K., & Rana, A. (2010). Natural fiber reinforced polystyrene matrix based composites. In *Advanced Materials Research* (Vol. 123, pp. 1175-1178). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.1175>

Singhal, R., Ishita, I., & Sow, P. K. (2019). Integrated polymer dissolution and solution blow spinning coupled with solvent recovery for expanded polystyrene recycling. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(6), 1240-1251. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01427-w>

Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., & Thomas, S. (1997). Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 66(5), 821-835. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19971031\)66:5<821::AID-APP2>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19971031)66:5<821::AID-APP2>3.0.CO;2-X)

Suarez, T., & Berger, G. I. L. S. O. N. (2009). Descripciones de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Cuadernos de Cátedra. Editorial Universitaria de Misiones. https://editorial.unam.edu.ar/images/documentos_digitales/f5_978-950-579-154-5.pdf

Tadasse, S., Abdellah, K., Prasanth, A., Goytom, D., & Deepati, A. K. (2018). Mechanical characterization of natural fiber reinforced composites: An alternative for rural house roofing's. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 25016-25026. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.302>

Torres, F. G., & Aragon, C. L. (2006). Final product testing of rotational moulded natural fibre-reinforced polyethylene. *Polymer testing*, 25(4), 568-577. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.03.010>

Ullah, R., Tsui, MTK, Chow, A., Chen, H., Williams, C. y Ligaba-Osená, A. (2023). Micro(nano)plastic pollution in terrestrial ecosystem: emphasis on impacts of polystyrene on soil biota, plants, animals, and humans. *Environ Monit Assess*, 195 (1), 252. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10769-3>

Velandia, F. R. (2008). Estimación de módulo de elasticidad en materiales compuestos de matriz polimérica y fibras naturales cortas. Tesis de Maestría en Ingeniería. Universidad de los Andes. [https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20402/u335923.pdf?sequence=](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20402/u335923.pdf?sequence=1)