

Exploitation of agro-industrial wastes: Chemical and physical treatments of coconut fibers with potential use in composite materials

Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Tratamientos Químicos y Físicos de Fibras de Coco con potencial uso en materiales compuestos

Eduardo Argote Ortiz ^{1*} , Pedro Alban Bolaños ² , Elsa Susana Cajiao Buitrón ³ , Héctor Samuel Villada Castillo ⁴ 

¹ Departamento de Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca; e-mail: eduardote_2402@unicauca.edu.co.

² Departamento de Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca; e-mail: pedroab123@gmail.com.

³ Departamento de Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca; e-mail: ecajiao@unicauca.edu.co.

⁴ Departamento de Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca; e-mail: villada@unicauca.edu.co.

* Autor de correspondencia: Eduardo Argote Ortiz: eduardote_2402@unicauca.edu.co

Recibido: 05/09/2024

Aceptado: 10/11/2024

Fecha de Publicación: 27/11/2024



Derechos de autor: © 2024

Resumen: El aumento en la demanda de plásticos y el manejo deficiente de estos al final de su vida útil ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles como los materiales compuestos, reforzados con fibras naturales. Las fibras, como las de coco, han mostrado aumentar significativamente las propiedades de estos compuestos. En este estudio, se analizaron fibras de coco naturales (FCN) y tratadas con diferentes procesos químicos y físicos, como hidróxido de sodio (NaOH), hipoclorito de sodio (NaOCl) y ultrasonidos (U). Las propiedades estructurales, morfológicas y de absorción de agua se comprobaron a través de pruebas de espectroscopía infrarroja, absorción de agua y difracción de rayos X. Estos indicaron que las fibras tratadas presentan una disminución o pérdidas de bandas de transmitancia asociadas a lignina, hemicelulosa y mayor concentración de las bandas de celulosa. Por ende, se observó una mayor absorción de agua y un aumento en el índice de cristalinidad, lo que potencia su capacidad de refuerzo, y mejora la interacción entre una matriz polimérica y las fibras. Además, se destaca el potencial de aprovechamiento de residuos agroindustriales bajo un enfoque de economía circular, promoviendo su incorporación en nuevos productos sostenibles.

Palabras clave: fibra; *Cocos nucifera*, residuos, materiales compuestos.

Abstract: The growing demand for plastics and their poor end-of-life management has prompted the search for sustainable alternatives, such as natural fiber-reinforced composites. Fibers, such as coconut fibers, have been shown to improve these compounds' properties significantly. In this study, natural coir fibers (NCF) treated with different chemical and physical processes, such as sodium hydroxide (NaOH), sodium hypochlorite (NaOCl), and ultrasound (U), were analyzed. Structural, morphological and water absorption properties were tested by infrared spectroscopy, water absorption and X-ray diffraction tests. These indicated that treated fibers show a decrease or loss of transmittance bands associated with lignin, hemicellulose and a higher concentration of cellulose bands. Thus, higher water absorption and an increase in the crystallinity index were observed, which enhances its reinforcing capacity and improves the interaction between a polymeric matrix and the fibers. It also highlights the potential for the use of agroindustrial waste under a circular economy approach, promoting its incorporation into new sustainable products.

Keywords: fiber; *Cocos nucifera*, waste, composites.

DOI: <https://doi.org/10.57173/ritc.v1n18a8>

1. Introducción

En la actualidad el uso de materiales plásticos viene aumentando a gran escala, se estima que la producción alcanza los 480 millones de toneladas métricas al año [1]. A raíz de este suceso y los problemas ambientales que causa su incorrecta disposición final, muchas investigaciones se han inclinado por el desarrollo de materiales compuestos renovables, reciclables y biodegradables [2]. Además, los nuevos desarrollos buscan preservar los recursos naturales con un enfoque en economía sostenible, todo ello alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización (ODS) de las Naciones Unidas (ONU), el Pacto Verde de Europa, entre otros [3]. Así, se destaca el uso de fuentes naturales renovables como los polisacáridos, proteínas, lípidos, fibras naturales o su combinación. Las fuentes de estos materiales pueden ser desechos de agricultura, almidón, caña de azúcar o celulosa [4], [5].

Las fibras naturales se componen principalmente por celulosa componente mayoritario con valores de 36-50 %, hemicelulosa 11-32 % y lignina 15-25 %, tal cual como lo describen [4], [6]. Estas fibras se han convertido en un elemento esencial en el proceso de formación de materiales compuestos poliméricos, su función de refuerzo beneficia las propiedades mecánicas, térmicas, estructurales, entre otras. Por otro lado, estas fibras presentan la ventaja de ser un material ecológico, abundante, económico y fácilmente disponible, que muchas veces se obtiene de los residuos agroindustriales, lo cual favorece su uso en una amplia variedad de productos industriales, que buscan materias primas amigables con el medio ambiente [2], [7]. Entre las fibras que pueden tener un mayor rendimiento agrícola, está el sisal, el yute, la hoja de piña, el plátano y la fibra de coco [7], [8], [9], [10]. En Colombia la industria cocotera genera residuos de fibra equivalente a 38 890 toneladas anuales, las cuales en la actualidad se emplean en la industria textil, construcciones y en la agricultura [11].

La fibra de coco en general posee un potencial en el desarrollo de nuevos materiales compuestos, no obstante, es necesario una modificación de esta que permita la eliminación de impurezas y algunos componentes, que causen una baja compatibilidad con la matriz base. En este sentido, existen investigaciones de la fibra de coco como material de refuerzo, tal como lo describieron [12], ellos encontraron que la inclusión de fibras de coco tratadas con una solución NaOH al 4 %, incrementaron la resistencia a la flexión de un bioplástico fabricado a base de almidón de maíz. Este mismo comportamiento fue evidenciado por [8] a partir de fibras naturales de bagazo y fibra de coco tratadas con una solución NaOH al 5%, donde registraron aumentos en las propiedades mecánicas y en los valores del coeficiente de absorción acústica en un compuesto híbrido a partir de resina de poliéster y las fibras. De igual manera [12] investigaron el efecto de la fibra de coco modificada y sin modificar en una espuma compuesta de almidón de mandioca, observando un refuerzo en las propiedades mecánicas, pero baja estabilidad tras su inmersión en agua de la espuma con fibras sin modificar. Por el contrario, la adición de fibras modificadas proporcionó un aumento de la densidad en la espuma, mejoró la estabilidad en el agua, la absorción de humedad y las propiedades mecánicas. Por otro lado, [9] examinaron la influencia de la cáscara de coco como relleno en compuestos de poliéster de fibra de plátano, observando que un 3 % de fibra mejora la estabilidad térmica y la resistencia a la tracción. Sin embargo, un 5 % de fibra produjo una disminución en la resistencia a la flexión del compuesto, quizá causada por la aglomeración y falta de cohesión entre fibra y matriz.

Conforme a los avances tecnológicos reportados en la literatura, resulta importante la modificación de la fibra de coco y así maximizar su capacidad en el desarrollo de nuevos materiales compuestos. El objetivo de este trabajo fue modificar las fibras de coco mediante tratamientos con NaOH, NaOCl y ultrasonidos, y posteriormente analizar sus características estructurales, cristalinas y de absorción de agua, con el fin de evaluar su potencial en la formación de materiales compuestos. Este estudio genera alternativas para la gestión de la problemática actual relacionada con los residuos de la cadena productiva

de coco en la cosata pacífica de Colombia, por medio de la implementación de la economía circular.

2. Materiales y métodos

2.1. Preparación y modificación de las fibras de coco

Las fibras de coco secas fueron suministradas por productores de la cadena agroindustrial de coco de la Costa Pacífica Cauca de Colombia, posteriormente fueron seleccionadas, se les retiraron las impurezas y luego se molieron en un triturador-picador industrial (TP-8, Peganos, Colombia) provista de una malla de 2 mm de abertura. Esta fibra se denominó como FCN y se realizaron 3 tratamientos a la fibra.

2.1.1. Tratamiento con hidróxido e hipoclorito de sodio

Esta etapa se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita por [13] con algunas modificaciones. Inicialmente, primero las FCN fueron tratadas con una solución de NaOH al 10% (p/v), a 80 °C, durante 1 h. Luego, lavadas con agua destilada hasta pH cercano al neutro. Posteriormente, las fibras se sometieron a un tratamiento con una solución de NaOCl al 5% (v/v), a 30 °C, durante 1 h. Finalmente, se realizó el lavado de las fibras con agua destilada y se llevaron a un horno de convección forzada (Memmert GmbH UNB 500, Büchenbach, Alemania) a 50 °C durante 24 h. Las fibras resultantes se denominaron FCB.

2.1.2. Tratamiento con hidróxido e hipoclorito de sodio y ultrasonido

En esta etapa la modificación química se realizó bajo temperatura ambiente, utilizando un baño de ultrasonificación (Branson 3510E-MTH, output 42 kHz, Branson Ultrasonics Co., Danbury, CT, USA). Las fibras resultantes se denominaron FCBU.

2.1.3. Tratamiento con ultrasonidos

La FCN se sumergió en agua destilada en una relación 1:20 (g muestra: mL de disolvente), posteriormente, se empleó un baño ultrasónico por 1 h, luego se lavó y se llevó a secar a 50 °C por 24 h [14]. Las fibras resultantes se denominaron FCU.

2.2. Caracterización de las fibras de coco modificadas y sin modificar

2.2.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

El análisis característico de los enlaces en los grupos funcionales para la fibra de coco modificada y sin modificar, se realizó en el equipo IKFourier Shimadzu IRAffinity-1S spectrometer, con medición de ATR con un diamante de cristal entre 600 y 4000 cm⁻¹ a una resolución de 4 cm⁻¹ y 45 scans [13].

2.2.2. Absorción de Agua

El porcentaje de absorción de agua se determinó utilizando el procedimiento de [15] con algunas modificaciones. Las fibras de coco modificadas y sin modificar se secaron, luego se pesaron en una balanza analítica (peso seco W_d) (Radwag XA 110/X) y se sumergieron en agua destilada por 24 h. Seguidamente, se retiró la humedad y se procedió a pesar (peso húmedo W_s) para calcular el porcentaje agua absorbida con la ecuación 1.

$$\text{Absorción de agua (\%)} = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} * 100 \quad (1)$$

2.2.3. Difracción de rayos X (XRD)

Para el análisis XRD para las fibras de coco modificadas y sin modificar, se empleó un difractómetro de rayos X (D8 Advance ECO, Bruker, EE. UU.). Las CF se analizaron en un rango de 2θ de 10-80°, con radiación Kα, con voltaje de 40kV y 25mA [16]. Los cálculos del índice de cristalinidad (IC) se realizaron por el método de altura XRD y fueron definidos por la ecuación 2 de Segal et al., (1959), donde I_{002} es la intensidad del pico cristalino y I_{AM} es la intensidad de la fase amorfa.

$$IC = \frac{(1002 - I_{am})}{1002} * 100\% \quad (2)$$

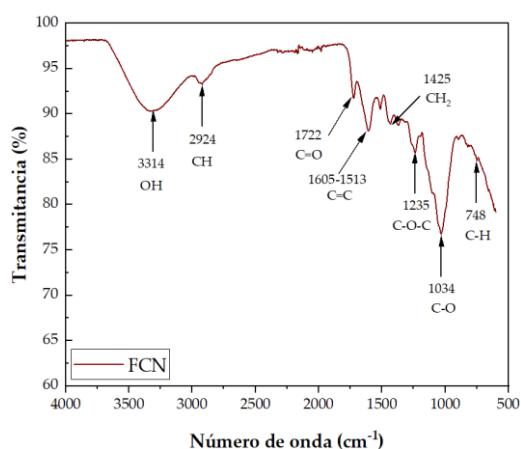
3. Resultados

3.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

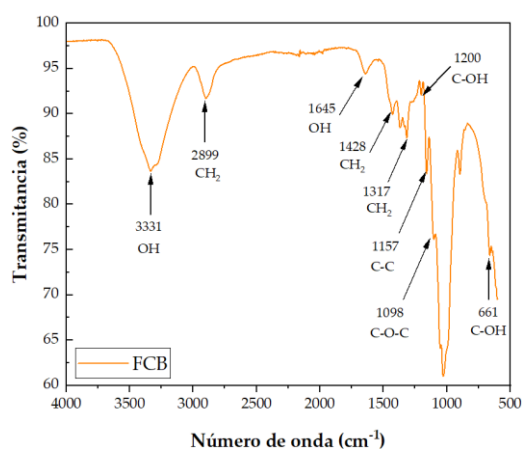
Las bandas que presentaron los espectros de IR se muestran en la Tabla 1 y Figura 1, donde se visualizan cambios en algunas de las bandas de absorción de los enlaces de característicos de las fibras de coco modificadas y sin modificar. Estos cambios se relacionan con un aumento o disminución en la intensidad de las bandas.

Tabla 1. Bandas observadas en los espectros de fibra de coco modificada y sin modificar.

FCN	FCB	FCBU	FCU
(cm ⁻¹)			
3314	3331	3336	3329
2924	-	-	-
-	2899	2897	2897
1722	-	-	1730
-	1645	1642	-
1605	-	-	1062
1513	-	-	1508
1430	1428	1426	1424
1369	1363	1364	1363
1316	1317	1314	1314
1235	-	1262	1227
-	1200	1202	1200
-	1155	1160	1163
1099	1098	1101	1101
-	1048	1051	1048
1034	1029	1024	1029
894	894	894	894
748	-	-	-
-	661	658	656



(a)



(b)

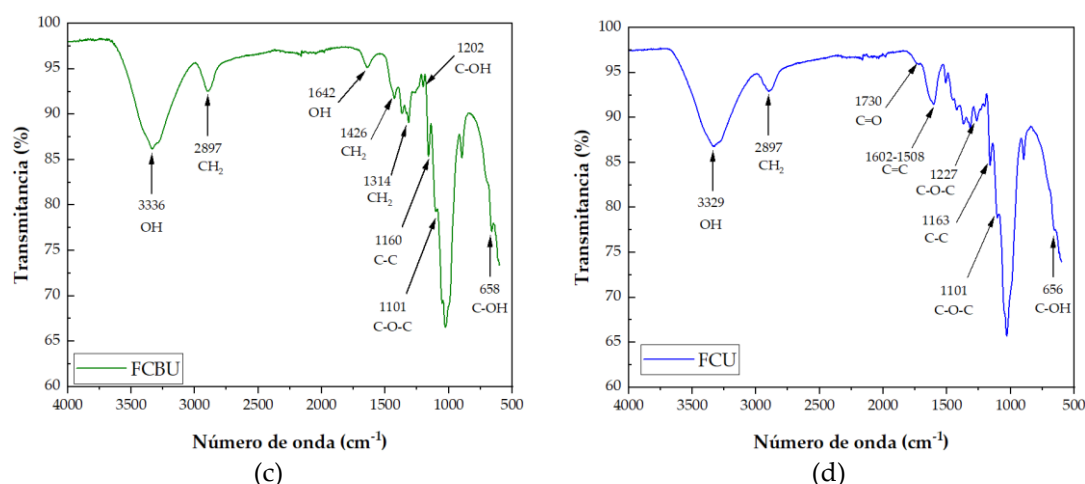


Figura 1. Espectros IR de las fibras de coco: (a) Fibra de coco natural (FCN); (b) Fibra de coco blanqueada (FCB); (c) Fibra de coco blanqueada en ultrasonido (FCBU) y (d) Fibra de coco en ultrasonido (FCU).

3.2. Absorción de agua

Los resultados obtenidos en este proceso se muestran en la Tabla 2. En ella se puede observar que los tratamientos poseen diferentes porcentajes de absorción, siendo mayor el tratamiento FCB con el 331 ± 6.28 % y el menor la FCN con 230.05 ± 3.94 % aproximadamente.

Tabla 2. Porcentajes de absorción de agua para las fibras de coco modificadas y sin modificar.

Tratamiento	Absorción Agua (%)
FCN	$230.05^d \pm 3.94$
FCB	$331.93^a \pm 6.28$
FCBU	$309.55^b \pm 10.61$
FCU	$276.34^c \pm 7.01$

¹ Las diferencias de letras (a - d) indican diferencia significativa ($p < 0.05$)

3.3. Difracción de rayos X (XRD)

Los difractogramas de rayos X obtenidos a partir de las fibras de coco naturales y modificadas se muestran en la Figura 2. En la figura 2a se observaron picos ubicados con mayores intensidades en 2θ en las posiciones 22.29° , 28.09° y 30.68° aproximadamente. También se presentaron picos con menores intensidades y con falta de definición en los picos $2\theta = 16.86^\circ$ y 34.82° . Luego en las figuras 2b, 2c y 2d, se conservan 3 picos con mayores intensidades en cada difractograma, en $2\theta = 16^\circ$, 22° y 34° , comparados con la figura 2a. Por otro lado, los índices de cristalinidad para los difractogramas de las fibras FCN, FCB, FCBU y FCU, fueron 36.58, 53.75, 50.08 y 39.14 respectivamente. En ellos se refleja un aumento en los índices de cristalinidad para FCB, FCBU y FCU respecto a FCN, información que ha sido concurrente con la reportada por diversos autores [6], [16], [18], [19], [20], [21] en fibras lignocelulósicas. Cabe resaltar que los valores de índice de cristalinidad en otros estudios pueden ser mayores o menores dependiendo de método empleado para su determinación y del origen de la celulosa. En este estudio en particular se empleó el método de altura XRD, el cual es uno de los más reportados en el análisis de celulosa o materiales que contengan celulosa en su composición, debido a su fácil y sencillo manejo en la determinación de índices de cristalinidad [22].

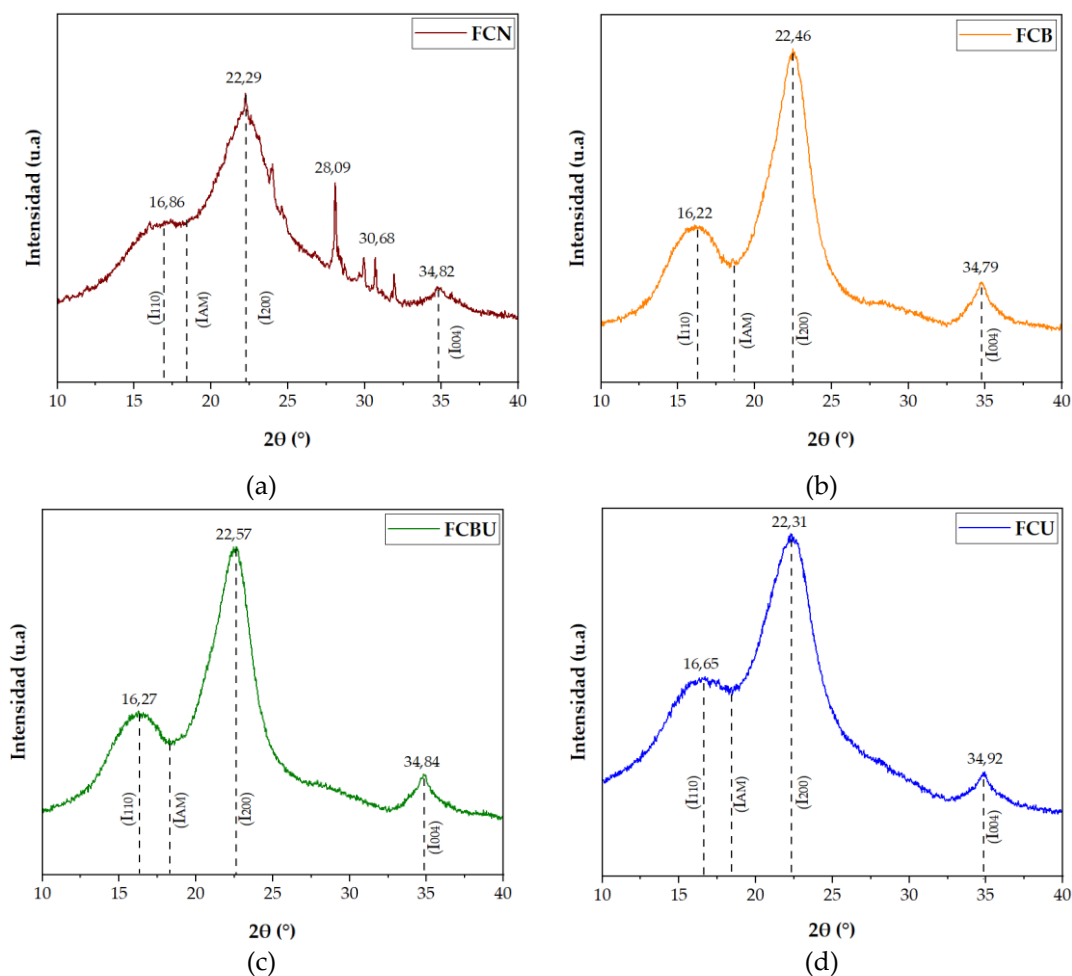


Figura 2. Difractogramas de las fibras de coco: (a) Fibra de coco natural (FCN); (b) Fibra de coco blanqueada (FCB); (c) Fibra de coco blanqueada en ultrasonido (FCBU) y (d) Fibra de coco en ultrasonido (FCU).

4. Discusión

4.1. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de las fibras de coco mostraron picos alrededor de los 3300 cm^{-1} , que se asocian al estiramiento del enlace OH pertenecientes a las moléculas de agua y la estructura de celulosa, indicando una tendencia hidrófila de las fibras. Luego se observó una banda en FCN alrededor de los 2924 cm^{-1} característica del estiramiento asimétrico del enlace CH presente en lignina y hemicelulosa, la cual, en las FCB, FCBU y FCU desaparece, y seguidamente se visualizó un pico nuevo cercano a los 2898 cm^{-1} , que se atribuye al estiramiento simétrico del CH_2 de celulosa, posiblemente indicando una mayor presencia en la fibra. Otro de los picos que nos indican este comportamiento en la fibra fue el que se ubicó en la banda 1730 cm^{-1} perteneciente al estiramiento del enlace $\text{C}=\text{O}$ de los grupos acetilo y éster urónico de la unión de los grupos carboxílicos del ácido ferúlico y p-cumárico en lignina y xilano en hemicelulosa, encontrándose en FCN y con una menor intensidad o pérdida en FCU, FCBU y FCB. El pico en 1645 cm^{-1} aproximadamente hace referencia al estiramiento del enlace OH del agua absorbida por la celulosa de las fibras [23], [24], [25], [26].

Las bandas alrededor de los 1603 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} se designan a la vibración de estiramiento $\text{C}=\text{C}$ de los anillos aromáticos de lignina, estas bandas se observaron en las FCN y FCU, lo cual indica que los tratamientos físicos tienden a conservar y no destruir este tipo de enlaces, ya que en los tratamientos químicos su intensidad desapareció. Las bandas 1430 cm^{-1} , 1360 cm^{-1} y 1315 cm^{-1} indica las deformaciones de alcano con la flexión simétrica del enlace CH y CH_2 de celulosa, y se presentan en todas las fibras denotando

mayor intensidad en las fibras modificadas física y químicamente. Luego la banda en 1235 cm^{-1} aproximadamente se asocia con el estiramiento del enlace C-O-C de lignina y hemicelulosa. Se observó una reducción de su intensidad en las FCBU y FCU, y una pérdida de esta en FCB, sugiriendo una mayor eficiencia en extracción de estos compuestos por medio de tratamientos con NaOH y NaOCl en presencia de calor [6], [14], [19], [20], [26], [27].

Adicionalmente, los picos característicos de celulosa a 1200 cm^{-1} y 660 cm^{-1} correspondientes a la flexión del enlace C-OH, los picos 1048 cm^{-1} y 1030 cm^{-1} al estiramiento del enlace C-O del esqueleto del anillo de piranosa [23], los picos 1100 cm^{-1} al estiramiento C-O-C, el pico 894 cm^{-1} se asocia a los enlaces β -glicosídicos entre las unidades de anhidroglucosa y el pico a 1160 cm^{-1} corresponde al estiramiento simétrico de C-C, fueron visualizados con mayor intensidad en las fibras modificadas indicando una mayor fracción de celulosa [20], [23], [26]. Por su parte, los picos de transmitancia cercanos a 3330 , 2899 , 1430 , 1315 , 896 cm^{-1} hacen referencia a la celulosa nativa I, la cual se pudo corroborar por medio del análisis de difracción de rayos X observando los picos característicos en 2θ .

En general, el análisis FTIR permitió evidenciar que los tratamientos químicos provocaron mayores transformaciones en la estructura molecular de las fibras de coco, a diferencia de la fibra tratada solo con ultrasonido, posiblemente la cavitación no fue lo suficientemente intensa para generar alteración en los enlaces. Sin embargo, se puede suponer que ocurrió una reducción del contenido de lignina y hemicelulosa por la desaparición y/o reducción de sus bandas características. Esto probablemente fue consecuencia de la despolimerización, oxidación o ruptura de los enlaces de las cadenas de estos componentes, tal como lo indicaron los autores citados [23], [24], [25], [27], [28], los cuales reportaron resultados similares en sus investigaciones. Finalmente, como consecuencia se observó un aumento en las bandas asociadas a la celulosa en los diferentes tratamientos.

4.2. Absorción de agua

La capacidad de un material para absorber agua se relaciona con su carácter hidrofílico, y las fibras poseen tres componentes que confieren modificaciones a este carácter. Es decir, la lignina confiere rigidez a la fibra y actúa como un agente cementante debido a su carácter hidrófobo, por su parte la hemicelulosa, ayuda a la formación de la red entre celulosa y hemicelulosa, y finalmente, la celulosa es la responsable del carácter hidrofílico de las fibras, debido a su estructura rica en grupos OH libres [29]. Los resultados de la tabla 2 permitieron observar que las fibras FCB y FCBU presentaron mayor absorción de agua, luego de los tratamientos físico-químicos, posiblemente porque expusieron una mayor fracción de celulosa, ya que la lignina y la hemicelulosa al ser soluble en solución alcalina y agua se pudieron retirar por medio de esos tratamientos químicos [29], hipótesis que se confirma con el análisis por espectroscopia, al observarse una reducción en la intensidad de las bandas características de la lignina y hemicelulosa.

Por otra parte, la FCN al poseer en su composición una mayor fracción con carácter hidrófobo, posiblemente hizo que obtuviera un menor porcentaje de absorción de agua. Porcentajes similares han sido reportados por [30], con porcentajes del 145 % para bambú, 180 % sisal, 327 % mazorca de maíz, 132 % linaza y 133 % bagazo. Es importante destacar que una mayor fracción de celulosa en las fibras (formada por largas cadenas de microfibrillas de celulosa cristalina en una disposición en forma de hélice) y alta cristalinidad, modifica las propiedades mecánicas y la sensibilidad al agua de un material compuesto con almidón, puesto que una mayor disponibilidad de hidroxilos puede generar una mayor interacción con los grupos del almidón, y de este modo se incrementan dichas propiedades, como el módulo elástico, la resistencia a la tracción y absorción de agua de las fibras. Además, la lignina y la hemicelulosa, podrían dificultar las interacciones entre una matriz y las fibras, por su incompatibilidad e hidrofobicidad, por ende, realizar una modificación química o física a las fibras destinadas a la fabricación de

materiales compuesto resulta en una mayor eficiencia en las propiedades físico-mecánicas del producto final [29].

Estudios que complementan lo mencionado son los realizados por [14], donde modificó fibras de agave por ultrasonido y plasma, para su incorporación en una película de almidón, logrando una mejor interacción y reducción de los sitios de unión del agua entre el almidón, glicerol y las fibras. Como consecuencia, se disminuyó la permeabilidad al vapor de agua, el hinchamiento, la solubilidad, y aumentó el ángulo de contacto de las películas. Otro estudio fue el de [13], que obtuvieron una mayor reducción de la absorción de agua con la inclusión de fibras de fique modificadas químicamente con NaOH y NaOCl en una matriz de almidón de yuca, quienes posiblemente atribuyen este resultado a una mayor formación de la red de enlaces de hidrógeno entre la matriz y la fibra modificada.

4.3. Difracción de rayos X (DRX)

En los resultados obtenidos en el difractograma de FCN se pudieron observar una secuencia de picos que podrían estar relacionados con la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes característicos de las fibras lignocelulósicas, picos similares fueron encontrados por [6], [18], [19], [20] en fibras de coco. Luego los picos se mantuvieron en las figuras 2b, 2c y 2d, pueden asociarse a la presencia de una mayor proporción de celulosa en las fibras tratadas, ya que picos en $2\theta = 16^\circ$, 22° y 34° corresponden a los planos cristalográficos de celulosa, (110), (200) y (004) respectivamente [6], [18]. El pico más alto en $2\theta = 22^\circ$ se atribuye al plano cristalográfico (200), que se presenta en la mayoría de las fibras naturales, este plano pertenece a la celulosa I, también se designa como celulosa I(β), por su estructura monoclinica, lo que a su vez conlleva a una mejora en la absorción de agua y en las propiedades mecánicas de la fibra [6], [14]. De estos resultados se puede inferir que los tratamientos con hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio y ultrasonido ayudaron en la eliminación de las fracciones amorfas presentes en la fibra de coco, dejando al descubierto las fases cristalinas de la celulosa. Datos semejantes son reportados por [21] en fibras de coco deslignificadas. Esto corrobora que el proceso de eliminación de lignina y hemicelulosa conlleva a tener picos de celulosa I más intensos y definidos.

Por otro lado, un aumento en los índices de cristalinidad de FCB, FCBU y FCU respecto a FCN, corrobora una vez más la hipótesis de una eliminación de componentes no cristalinos, hemicelulosa amorfa, lignina, cera, etc. Además, las fibras tratadas pueden presentar una reordenación en las regiones cristalinas y, por ende, un carácter más cristalino [7], [16], [18], [19], [21], [23], [31]. De este modo, se aumenta el índice de cristalinidad, el cual incide de forma positiva con un aumento en la densidad y dureza de las fibras [20], [21]. Resultados similares fueron reportados por [32], quien confirma que a medida que aumenta la cristalinidad también aumenta la fracción de celulosa en las muestras tratadas, y que tratamientos más severos pueden destruir los enlaces de hidrógeno responsables de las interacciones físicas que mantienen unidas la microfibrilla de celulosa.

Finalmente, los métodos empleados demostraron ser eficientes en la reducción de componentes no deseados en la superficie de las fibras, lo cual favorece la exposición de los grupos hidroxilo de celulosa, que a su vez ocasiona una mayor ~~mejor~~ interacción, adhesión entre los enlaces de hidrógeno de la fibra y una matriz polimérica en la formación de compuestos [29]. Métodos de modificación de fibras relacionados con ultrasonidos demostraron ser eficientes en el desarrollo de un compuesto a base de almidón de yuca y fibras de agave, ya que aumentaron su cristalinidad y a su vez incrementan las propiedades mecánicas del compuesto. Por otro lado, [33] emplearon métodos alcalinos en la modificación de fibras de cáscaras de arroz para formar películas con almidón de yuca. Este tratamiento aumento la interacción entre la matriz y la fibra, debido a la superficie de la fibra presento mayor disponibilidad de grupos -OH, por consiguiente, aumentaron las propiedades mecánicas del compuesto.

5. Conclusiones

Las fibras de coco modificadas se perfilan con potencial para su uso en materiales compuestos, debido a que presentan una mayor proporción de celulosa en su estructura química. Esto se logró evidenciar por medio del análisis FTIR, el cual señaló la eliminación y reducción de bandas asociadas a la lignina y la hemicelulosa, y un aumento en la intensidad de las bandas relacionadas con la celulosa. La absorción de agua mostró un aumento en las fibras ya que, al existir mayor fracción de celulosa, habrá mayor disponibilidad de grupos hidroxilos compatibles con el agua. Finalmente, los difractogramas DRX indicaron un aumento notable en la cristalinidad de las fibras modificadas, relacionada con la pérdida de las fracciones amorfas de la fibra. Por lo tanto, este estudio propone un enfoque innovador para el uso eficiente de las fibras de coco, al ser un recurso renovable y respetuoso con el medio ambiente, estas fibras tienen una gran capacidad como material de refuerzo en la fabricación de materiales compuestos.

Fondos: Este trabajo fue apoyado por El Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de la República de Colombia (Números de subvención: 82351).

Agradecimientos: Los autores agradecen al proyecto de Jóvenes Investigadores e Innovadores en el Departamento del Cauca, al proyecto de Fortalecimiento de la red de valor de la yuca en Colombia mediante coinnovación en producción primaria, transformación y acceso a mercados con criterios de sostenibilidad, competitividad y circularidad, desarrollado en el Departamento del Cauca y al grupo de Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial CYTBIA.

Referencias

- [1] A. Surendren, A. K. Mohanty, Q. Liu, and M. Misra, "A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives," 2022, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d2gc02169b.
- [2] M. Selvaraj, N. Pannirselvam, P. T. Ravichandran, B. Mylsamy, and S. Samson, "Extraction and Characterization of a New Natural Cellulosic Fiber from Bark of Ficus Carica Plant as Potential Reinforcement for Polymer Composites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 2, 2023, doi: 10.1080/15440478.2023.2194699.
- [3] A. Zamboulis, E. Xanthopoulou, I. Chrysafi, C. Lorenzo, and D. N. Bikiaris, "Poly(ethylene succinate)/hemp fiber composites: Fully biobased materials with improved thermal and biodegradation properties," *Sustainable Chemistry for the Environment*, vol. 4, p. 100045, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.scenv.2023.100045.
- [4] M. A. Mahmud, N. Abir, F. R. Anannya, A. Nabi Khan, A. N. M. M. Rahman, and N. Jamine, "Coir fiber as thermal insulator and its performance as reinforcing material in biocomposite production," May 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15597.
- [5] S. Rodríguez-Fabià, C. Zarna, and G. Chinga-Carrasco, "A comparative study of kraft pulp fibres and the corresponding fibrillated materials as reinforcement of LDPE- and HDPE-biocomposites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 173, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107678.
- [6] B. M. Bright *et al.*, "Characterization of Natural Cellulosic Fiber from Cocos nucifera Peduncle for Sustainable Biocomposites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 14, pp. 9373–9383, 2022, doi: 10.1080/15440478.2021.1982827.
- [7] K. N. Bharath *et al.*, "Study of Treatment Effect on the Cocos Nucifera Lignocellulosic Fibers as Alternative for Polymer Composites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 1, 2023, doi: 10.1080/15440478.2022.2134257.
- [8] M. K. Marichelvam, K. Kandakodeeswaran, and M. Geetha, "Mechanical and Acoustic properties of Bagasse–Coconut Coir based Hybrid Reinforced Composites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 11, pp. 4105–4114, 2022, doi: 10.1080/15440478.2020.1854143.
- [9] G. Kannan and R. Thangaraju, "Evaluation of Tensile, Flexural and Thermal Characteristics on Agro-Waste Based Polymer Composites Reinforced with Banana Fiber/Coconut Shell Filler," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 1, 2023, doi: 10.1080/15440478.2022.2154630.
- [10] N. I. N. Haris, M. Z. Hassan, and R. A. Ilyas, "Crystallinity, Chemical, Thermal, and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk/Coco Peat Fiber Reinforced ABS Biocomposites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 16, pp. 13753–13764, 2022, doi: 10.1080/15440478.2022.2106339.

- [11] T. S. Gomez, S. Zuluaga Palacio, M. C. Salazar Marín, A. F. Peñuela, and P. Fernández Morales, "Comportamiento mecánico de fibras y no tejidos de coco. Comparación entre parámetros de punzonado y adhesión química," *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 17, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.5255.
- [12] W. Nansu, S. Ross, G. Ross, and S. Mahasaranon, "Coconut residue fiber and modified coconut residue fiber on biodegradable composite foam properties," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 3594–3599. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.623.
- [13] A. Parra-Campos, L. Serna-Cock, and J. F. Solanilla-Duque, "Effect of the addition of fique bagasse microparticles in obtaining a biobased material based on cassava starch," *Int J Biol Macromol*, vol. 207, pp. 289–298, May 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2022.03.016.
- [14] I. Sifuentes-Nieves *et al.*, "Biobased sustainable materials made from starch and plasma/ultrasound modified Agave fibers: Structural and water barrier performance," *Int J Biol Macromol*, vol. 193, pp. 2374–2381, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.11.071.
- [15] C. Moreno, L. E. ; Trujillo, E. E. ; Osorio, and L. Rocio, "Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua Angustifolia," *Scientia Et Technica*, vol. XIII, no. ISSN 0122-1701, pp. 613–618, May 2007, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934104>
- [16] F. A. Gonçalves, H. A. Ruiz, E. Silvino dos Santos, J. A. Teixeira, and G. R. de Macedo, "Bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* and *Zymomonas mobilis* from delignified coconut fibre mature and lignin extraction according to biorefinery concept," *Renew Energy*, vol. 94, pp. 353–365, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.03.045.
- [17] L. Segal, J. J. Creely, A. E. Martin, and C. M. Conrad, "An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer," *Textile Research Journal*, vol. 29, pp. 786–794, Mar. 1959, doi: 10.1177/004051755902901003.
- [18] A. K. Balan, S. Mottakkunnu Parambil, S. Vakyath, J. Thulissery Velayudhan, S. Naduparambath, and P. Etathil, "Coconut shell powder reinforced thermoplastic polyurethane/natural rubber blend-composites: effect of silane coupling agents on the mechanical and thermal properties of the composites," *J Mater Sci*, vol. 52, no. 11, pp. 6712–6725, Jun. 2017, doi: 10.1007/s10853-017-0907-y.
- [19] F. A. Gonçalves, H. A. Ruiz, C. D. C. Nogueira, E. S. Dos Santos, J. A. Teixeira, and G. R. De Macedo, "Comparison of delignified coconuts waste and cactus for fuel-ethanol production by the simultaneous and semi-simultaneous saccharification and fermentation strategies," *Fuel*, vol. 131, pp. 66–76, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.04.021.
- [20] R. Arun, R. Shruthy, R. Preetha, and V. Sreejit, "Biodegradable nano composite reinforced with cellulose nano fiber from coconut industry waste for replacing synthetic plastic food packaging," *Chemosphere*, vol. 291, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132786.
- [21] Y. Leow *et al.*, "A tough, biodegradable and water-resistant plastic alternative from coconut husk," *Compos B Eng*, vol. 241, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110031.
- [22] S. Park, J. O. Baker, M. E. Himmel, P. A. Parilla, and D. K. Johnson, "Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance," *Biotechnology for Biofuels*, vol. 3, pp. 1–10, 2010, doi: 10.1186/1754-6834-3-10.
- [23] F. A. Fedin, H. Mohan, S. Thomas, and J. Kochupurackal, "Synthesis and characterization of nanocelluloses isolated through acidic hydrolysis and steam explosion of *Gliricidia sepium* plant fiber," *Biomass Convers Biorefin*, 2024, doi: 10.1007/s13399-024-05812-x.
- [24] T. Tenaye, S. A. Mohammed, and S. A. Jabasingh, "Sustainable synthesis and characterization of Enset cellulose nanocrystals (E-CNp) from Enset ventricosum biomass and its application in the fabrication of Enset cellulose nanocomposite (E-CNc)," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 14, no. 4, pp. 5019–5034, Feb. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02682-z.
- [25] A. S. Aridi *et al.*, "Effect of Sodium Hypochlorite Concentration during Pre-treatment on Isolation of Nanocrystalline Cellulose from *Leucaena leucocephala* (Lam.) Mature Pods," *Bioresources*, vol. 16, pp. 3137–3158, 2021.

- [26] T. Gabriel, A. Belete, G. Hause, R. H. H. Neubert, and T. Gebre-Mariam, "Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Different Lignocellulosic Residues: A Comparative Study," *J Polym Environ*, vol. 29, no. 9, pp. 2964–2977, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10924-021-02089-3.
- [27] P. J. Kallappa, P. G. Kalleshappa, B. B. Eshwarappa, S. Basavarajappa, V. S. Betageri, and B. K. Devendra, "Synthesis of cellulose nanofibers from lignocellulosic materials and their photocatalytic dye degradation studies," *Int Nano Lett*, vol. 13, no. 3–4, pp. 261–272, Dec. 2023, doi: 10.1007/s40089-023-00402-7.
- [28] M. Chávez Sifontes and M. E. Domine, "Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial," *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 4, no. 4, pp. 15–46, Oct. 2013, [Online]. Available: http://www.exeeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/15
- [29] G. F. Schutz, S. de Ávila Gonçalves, R. M. V. Alves, and R. P. Vieira, "A review of starch-based biocomposites reinforced with plant fibers," Mar. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129916.
- [30] H. Bui, N. Sebaibi, M. Boutouil, and D. Levacher, "Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials," *Fibers*, vol. 8, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/FIB8060037.
- [31] F. G. De Souza, L. O. Paiva, R. C. Michel, and G. E. De Oliveira, "Modificação da Fibra de Coco com Polianilina e o seu Uso como Sensor de Pressão," *Polímeros*, vol. 21, pp. 39–46, 2011.
- [32] A. Fatmawati, T. Nurtono, and A. Widjaja, "Thermogravimetric kinetic-based computation of raw and pretreated coconut husk powder lignocellulosic composition," *Bioresour Technol Rep*, vol. 22, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101500.
- [33] P. Boonsuk *et al.*, "Structure-properties relationships in alkaline treated rice husk reinforced thermoplastic cassava starch biocomposites," *Int J Biol Macromol*, vol. 167, pp. 130–140, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.11.157.