

Caracterización física, química, térmica y mecánica de fibras de coco de la Costa Pacífica del Cauca con potencial como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica*

Physical, chemical, thermal and mechanical characterization of coconut fibers from the Pacific Coast of Cauca with potential as reinforcement of polymeric matrix composite materials

CERON-MENESES, YINA-PAOLA¹; ALBAN-BOLAÑOS, PEDRO²; GRASS-RAMÍREZ, JOSÉ-FERNANDO³; CAMACHO-MUÑOZ, RICARDO⁴

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 8 de Noviembre 2023

Aprobado para publicación: 30 de mayo 2024

* Proyecto de investigación de origen: Fortalecimiento de la cadena productiva del coco de la Costa Pacífica del Cauca. Etapa I: Estudio de viabilidad de las estrategias de agregación de valor al coco de la Costa Pacífica del Cauca. Financiación: Sistema General de Regalías (SGR) (2021-2023).

- 1 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA). Ingeniera Agroindustrial. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7205-6148>
- 2 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA). M.Eng Ingeniería de Alimentos. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6473-0756>
- 3 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación en Desarrollo Rural (TULL). Ph.D. Ciencias Económico-Agroindustriales. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6081-4581>
- 4 Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial (CYTBIA). M.Sc. Biotecnología. Popayán, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-9265-3468>

Correspondencia: yinac@unicauca.edu.co

Cómo citar este artículo

CERON-MENESES, YINA-PAOLA; ALBAN-BOLAÑOS, PEDRO; GRASS-RAMÍREZ, JOSÉ-FERNANDO; CAMACHO-MUÑOZ, RICARDO. Caracterización física, química, térmica y mecánica de fibras de coco de la Costa Pacífica del Cauca con potencial como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 22, n. 2, 2024, p. 30-42. Doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v22.n2.2024.2291>

RESUMEN

La fibra de coco es un subproducto al que no se le da buen manejo, generando consecuencias medioambientales y económicas, debido a que su acumulación perturba las dinámicas ecosistémicas y actividades productivas. Una de las estrategias desarrolladas para mitigar su impacto consiste en la incorporación de sus fibras como refuerzo en materiales compuestos. En este contexto, se estudiaron las fibras de tres variedades de coco de la Costa Pacífica del Cauca, con el objetivo de evaluar su viabilidad como matriz de refuerzo, mediante técnicas de resistencia a la tensión, espectroscopia (FTIR), adsorción de agua, termogravimetría (tga), granulometría y relación de aspecto, encontrando que los valores más altos en resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y elongación en el punto de rotura fueron de 302,68 MPa, 5,82 y 28,18 % respectivamente. En espectroscopia se observaron picos entre 3340 y 897 cm^{-1} que indican presencia de celulosa, lignina, ceras y hemicelulosa. La adsorción de agua para las 3 muestras estuvo entre el 98 y 104 %, sin diferencias significativas. En tga se detectaron dos etapas de degradación, una inicial con picos máximos para las tres variedades entre 44,47 °C (A1), 50,62 °C (A2) y 39,50 °C (A3), en un intervalo de 24 a 125 °C, luego el pico se ubicó entre 190 °C a 390 °C, en este intervalo hubo una pérdida de peso de aproximadamente el 20 %. La relación de aspecto de las tres variedades entre los tamices 40 y 60 fue mayor a 10, indicando que la fibra es apta para ser usada como material de refuerzo en materiales compuestos. En conclusión, las tres variedades de fibra presentaron excelentes propiedades y cumplieron con las condiciones de estabilidad térmica y resistencia mecánica que las hace aptas para implementarlas como matriz de refuerzo en la fabricación de materiales compuestos.

PALABRAS CLAVES:

Fibra de Coco; Material Compuesto; Tensión; Relación de Aspecto; Termogravimetría; FTIR; Granulometría; Adsorción de agua; Matriz; Refuerzo.

ABSTRACT

Coconut fiber is a by-product that is not properly managed, generating environmental and economic consequences, because its accumulation disrupts ecosystem dynamics and productive activities. One of the strategies developed to mitigate its impact is the incorporation of its fibers as reinforcement in composite materials. In this context, the fibers of three varieties of coconut from the Pacific Coast of the Cauca were studied, with the aim of evaluating their feasibility as a reinforcement matrix through stress resistance techniques, spectroscopy (FTIR), water adsorption, thermogravimetric (tga), granulometry and aspect ratio, finding that the highest values in voltage resistance, elasticity module and elongation at the breakpoint were 302,68 MPa, 5,82 and 28,18 % respectively. In spectroscopy, spikes between 3340 and 897 cm^{-1} were observed indicating the presence of cellulose, lignin, cherries and hemicellulose. Water adsorption for the 3 samples was between 98 and 104 % without significant differences. In tga, two stages of degradation were detected, the initial one with peak peaks for the three varieties between 44,47 °C (A1), 50,62 °C (A2) and 39,50 °C (A3), in a range of 24 to 125 °C, then the peak was between 190 °C to 390 °C. In this range there was a weight loss of approximately 20 %. The aspect ratio of the three varieties between thorns 40 and 60 was greater than 10, indicating that the fiber is suitable for use as

KEY WORDS:

Coconut Fiber; Composite Material; Tension; Aspect Ratio; Thermogravimetry; FTIR; Granulometry; Water Adsorption; Matrix; Reinforcement.

reinforcement material in composite materials. In conclusion, the three fibers presented excellent properties and met the conditions of thermal stability and mechanical resistance which makes them suitable for implementation as a reinforcement matrix in the manufacture of composite materials.

INTRODUCCIÓN

El Departamento del Cauca es el tercer productor de coco en Colombia, con una producción de más de 17,5 mil toneladas anuales, esta producción se concentra principalmente en los municipios costeros y exhibe niveles bajos de tecnificación (Gobernación Del Cauca, 2021), por lo cual, del fruto que se encuentra formado por 25 % de agua, 28 % de copra, 12 % de endocarpio y 35 % de cáscara fibrosa o mesocarpio (Trujillo & Arias, 2013), solo se aprovecha exclusivamente la copra y el agua que corresponden a un 53 %, mientras que el 47 % restante (estopa) se emplea en pocas cantidades.

La estopa es un subproducto al que no se le da buen manejo y es desechada en las fincas productoras, incinerada o dispuesta en ríos de la zona, lo cual ha generado graves consecuencias ambientales y económicas debido a que su acumulación perturba las dinámicas ecosistémicas y actividades productivas como la pesca artesanal. Es por eso que se está estimulando el desarrollo de técnicas de procesamiento para convertir estos residuos en un producto útil y de mayor valor agregado, que mitigue una problemática ambiental y genere ingresos económicos adicionales (Cury *et al.*, 2017), como los compuestos de fibras vegetales y plástico (WPC).

Los compuestos de madera y plástico (WPC) son biocompuestos típicos fabricados con fibras lignocelulósicas y una matriz de resinas termoplásticas mediante extrusión (Mu *et al.*, 2021). Los materiales compuestos de fibra natural son duraderos, fiables, ligeros y tienen propiedades mecánicas superiores a las de otros materiales (Siva *et al.*, 2021). Para desarrollar un compuesto de fibra natural con mejores propiedades mecánicas, el fabricante debe tener un gran conocimiento de las fibras vegetales (Vinod *et al.*, 2023), lo que ha impulsado a que diversos investigadores hayan realizado su trabajo caracterizando fibras naturales como sisal (Belaadi *et al.*, 2014), piña (Najeeb *et al.*, 2020), fique (Muñoz *et al.*, 2014), banano (Saravanan & Gnanavel 2020) como materiales de refuerzo.

La fibra de coco se destaca como una de las fibras naturales más prometedoras para ser utilizada como matriz de refuerzo en materiales compuestos (Kumar & Raja, 2021). Investigaciones como la llevada a cabo por Sarki *et al.* (2011) han explorado la viabilidad de emplear subproductos como la cáscara de coco para refuerzos alternativos en materiales compuestos de polímeros. Los resultados de este estudio sugieren que los residuos de cáscara de coco podrían ser una opción viable como refuerzo ecológico biodegradable, con mejoras en las propiedades mecánicas.

Además, diversos investigadores (Rincón *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2016; Basu *et al.*, 2017) han estudiado la fibra de coco y han observado que su composición puede variar dependiendo de su origen geográfico. Estos hallazgos resaltan la importancia de caracterizar adecuadamente la fibra de coco en función de su procedencia para comprender mejor sus propiedades y su potencial aplicativo en materiales compuestos.

Actualmente, existe una necesidad apremiante de buscar fibras vegetales con características mecánicas óptimas para actuar como refuerzo, es por esto que en la investigación se realizó la caracterización física, química, térmica y mecánica de tres variedades de fibra de coco cultivadas en la Costa Pacífica del Cauca, con el objetivo de evaluar su potencia como material de refuerzo en un material compuesto de matriz polimérica.

MÉTODO

Material

El material vegetal fue recolectado en tres municipios ubicados en la Costa Pacífica Caucana: Guapi, Timbiquí y López de Micay, en donde se analizaron las tres variedades de coco presentes en la zona: Típico (A1), Táparo o Malayo (A2) e Híbrido (A3). Las muestras se obtuvieron de las fincas de los productores y se trasladaron al Laboratorio de Reología y Empaques, ubicado en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, para su posterior análisis. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo condiciones de temperatura promedio de 23 °C, altitud de 1760 metros sobre el nivel del mar y una humedad relativa que osciló entre el 73 % y el 80 %

Propiedades mecánicas de tensión

La prueba de tensión se llevó a cabo en la máquina universal de ensayos (Shimadzu modelo EZ-L) con capacidad de 500 N, utilizando un marco de cartón paja para fijar la fibra (Figura 1). Los parámetros se ajustaron a la norma de la ASTM C1557-20 (*Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers*), en condiciones de temperatura ambiente, humedad relativa de 73 % y una velocidad de deformación de 2 mm/min para 20 especímenes por fibra. Los resultados de la prueba fueron la resistencia máxima a la tensión, el módulo de elasticidad y elongación máxima en el punto de rotura.

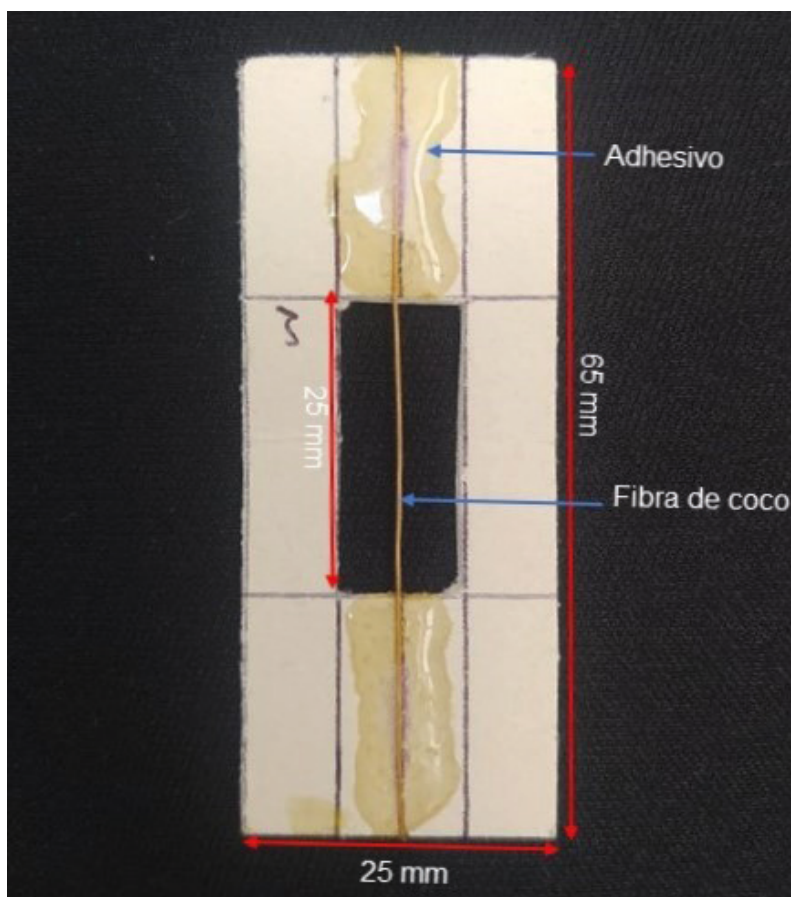


Figura 1. Montaje de muestra para medir resistencia a la tensión.

Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier con resonancia de transmitancia atenuada (FTIT-ATR)

Se cortaron trozos de mesocarpio del coco con un área aproximada de 25 mm² y se llevaron durante 24 horas a un desecador para retirar humedad. Posteriormente, las fibras se examinaron en un espectrofotómetro modelo IS50 Nicolet, (ThermoScientific, EE.UU). El espectro fue adquirido utilizando el modo de reflexión entre 400 cm⁻¹ y 4000 cm⁻¹, donde se trabajó con un promedio de 32 exploraciones por minuto y una resolución de 4 cm⁻¹ a 25 °C (Basu *et al.*, 2017; Moshi *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos fueron recopilados y analizados en OriginPro versión 2018 para corregir y normalizar los datos (entre 0 y 1) y así obtener los espectros.

Adsorción de agua

Esta metodología se basó en estudios realizados por Moreno *et al.* (2007) y Azanaw & Ketema (2022). Se cortaron 20 fibras de 6 cm de longitud y se secaron por 24 horas a 50 ± 3 °C, se pesó cada fibra (m_1 : masa de la muestra seca) en una micro balanza con una precisión de 0,00001 g. Una vez pesados los especímenes se sumergieron en agua destilada durante 24 horas a temperatura constante de 23 ± 1 °C. Al termino de este tiempo, se retiraron los especímenes, se retiró el exceso de agua presente en la superficie y se pesó nuevamente (m_2 : masa de la muestra húmeda). Esta operación se hizo por triplicado. El porcentaje de adsorción de agua (ADA) se obtuvo con la ecuación 1.

$$ADA = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (Ec. 1)$$

Termogravimetría

La estabilidad térmica de las fibras de coco se evaluó mediante la técnica de termogravimetría (TGA) de acuerdo con la metodología estipulada en la norma internacional ASTM E 1131-08 (2014). De cada variedad de coco (Típico, Táparo e Híbrido) se tomó una porción de muestra de fibra (entre 4 y 6 mg), se depositó en una cápsula de platino y se introdujo en el analizador termogravimétrico (modelo SDT Q600 de TA Instruments). Las muestras fueron sometidas a calentamiento desde temperatura ambiente hasta 600 °C a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min en atmósfera inerte de nitrógeno.

Granulometría

La distribución de tamaño se realizó mediante granulometría. Inicialmente, las fibras de coco se molieron en un molino de martillos (TP8, Penagos, Colombia), el cual estaba provisto de una criba de 2 mm de abertura. Luego, se tomaron 100 g de fibra molida y se tamizaron en un juego de tamices estándar ASTM E11-17 números 10, 30, 40, 50, 60, 70 y fondo, ubicándolos de forma descendente. Para determinar el porcentaje de fibra retenida en cada tamiz, se pesó cada retenido en una balanza con una precisión de 0,00001 g (Cajiao *et al.*, 2016).

Relación de aspecto

La relación de aspecto se evaluó por microscopía óptica de alta resolución MOAR utilizando un estereoscopio (Nikon Model C-DSS115) equipado con una cámara digital (Nikon DS-2Mv 2Mp). Las micrografías fueron obtenidas usando el software NIS Element F, se capturaron imágenes de los retenidos en los tamices 40 y 60 para las tres variedades de coco. Se usó el programa image J para calcular y exportar los datos de diámetro y longitud, a partir de los cuales, se calculó la relación de aspecto de cada fibra.

Análisis estadístico

Todos los datos se evaluaron mediante un análisis de varianza ANOVA. Para determinar las diferencias entre tratamientos, se empleó la prueba de Tukey, utilizando el software Minitab 2020 versión prueba.

RESULTADOS

Propiedades mecánicas de tensión

Las propiedades mecánicas de las fibras de coco de las variedades Típico (A1), Táparo (A2) e Híbrido (A3) se resumen en el Cuadro 1. En cuanto a la resistencia máxima a la tensión y al módulo de elasticidad, la muestra A3 exhibió los valores más elevados con $302,68 \pm 34,21$ MPa y $5,82 \pm 0,61$ GPa, respectivamente, en comparación con los otros dos tratamientos. Por otro lado, la elongación máxima en el punto de rotura fue mayor en la muestra A1, con un valor de $28,19 \pm 3,68$ %, lo que sugiere que las fibras del Híbrido (A3) podrían tener un contenido de celulosa mayor y/o una mayor cristalinidad. Investigaciones previas (Marvila *et al.*, 2021; Laverde *et al.*, 2022) han señalado que la celulosa contribuye a la formación de microfibrillas, lo que otorga una alta resistencia a la tensión y un módulo alto en las fibras vegetales, asimismo, se ha observado que las fibras más cristalinas presentan una mayor resistencia mecánica. Por otra parte, existe una relación inversa entre la resistencia a la tensión y la elongación de un material, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este estudio, donde las fibras con mayor resistencia a la tensión exhibieron una menor elongación (Bui *et al.*, 2020).

En relación con la resistencia máxima a la tensión, el módulo de elasticidad y la elongación máxima en el punto de rotura de las fibras de las tres variedades de coco estudiadas, se observaron valores que oscilaron entre 278,36 y 302,68 MPa, 4,09 y 5,82 GPa, y 17,30 y 28,19 %, respectivamente. Estos resultados se encuentran dentro del rango de valores reportados en la literatura, por ejemplo, Rao & Rao (2007) indican que la resistencia a la tracción y el módulo en fibras de coco pueden variar entre 108 y 252 MPa y 2,5 y 6 GPa, respectivamente, con un porcentaje de elongación a la rotura de 15 y 40 %; además, señalan que las fibras de coco son más fuertes y menos rígidas que las fibras de palma. Al respecto, Chokshi *et al.* (2022) reportan que la resistencia a la tracción y el módulo en fibras de coco pueden oscilar entre 95 y 593 MPa y 2,8 y 6 GPa, respectivamente, mientras que el porcentaje de elongación a la rotura puede situarse entre 15 y 51,4 %.

Cuadro 1. Propiedades de tensión de las tres variedades de fibras de coco.

Tratamientos	A1	A2	A3
Resistencia máxima a la tensión (Mpa)	$280,39 \pm 26,12^b$	$278,36 \pm 23,87^b$	$302,68 \pm 34,21^a$
Módulo de elasticidad (GPa)	$4,09 \pm 0,64^c$	$5,18 \pm 0,56^b$	$5,82 \pm 0,61^a$
Elongación máxima en el punto de rotura (%)	$28,19 \pm 3,68^a$	$19,13 \pm 2,06^b$	$17,30 \pm 2,49^b$

Medias dentro de una columna seguida de la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Espectroscopia de infrarrojo con trasformada de Fourier

En la figura 2 se muestra la espectroscopía FTIR de la fibra de coco para las tres variedades, Típico A1, Táparo A2 e Híbrido A3. Se observa un pico amplio e intenso a 3340 cm^{-1} , el cual sugiere vibraciones de estiramiento de los grupos OH presentes en la celulosa y la lignina (Basu *et al.*, 2020). Los picos a 2923 y 2850 cm^{-1} indican la presencia de cera dispersa en las fibras de coco, atribuible al estiramiento $\text{C} \equiv \text{C}$ (Moshi *et al.*, 2020; Dharmaratne *et al.*, 2021). La presencia de hemicelulosas, lignina y pectina se identifica mediante el pico a 1732 cm^{-1} , que corresponde al estiramiento de ésteres y aldehídos con CO conjugado (Mishra & Basu, 2020). El pico a 1608 cm^{-1} es característico de la lignina (Basu *et al.*, 2020). Además, la región comprendida entre 1439 y 1252 cm^{-1} está

asociada con el grupo C=H de la lignina (Dharmaratne *et al.*, 2021), al igual que la banda a 1515 cm^{-1} , que corresponde al enlace C=C del anillo aromático de la lignina. El pico ubicado a 1030 cm^{-1} se atribuye al estiramiento del grupo C-O-C presente en la celulosa (Moshi *et al.*, 2020), por último, el pico a 897 cm^{-1} es característico de los enlaces β, especialmente de las hemicelulosas (Hernández *et al.*, 2017).

Al comparar los tres espectros de las variedades de coco (Típico A1, Táparo A2 e Híbrido A3), se observa que el pico en la banda de 2850 cm^{-1} es más intenso en la variedad A2 en comparación con las otras dos variedades. Es importante destacar que las bandas a 2850 cm^{-1} y 2917 cm^{-1} se asignan a estiramientos simétricos y asimétricos de CH en grupos metoxilo aromáticos y en grupos metilo y metileno de cadenas laterales, dado que las moléculas de celulosa no contienen estos grupos, la presencia de estas bandas en la fibra de coco está relacionada con materiales no celulósicos, como la lignina, la pectina y/o la cera.

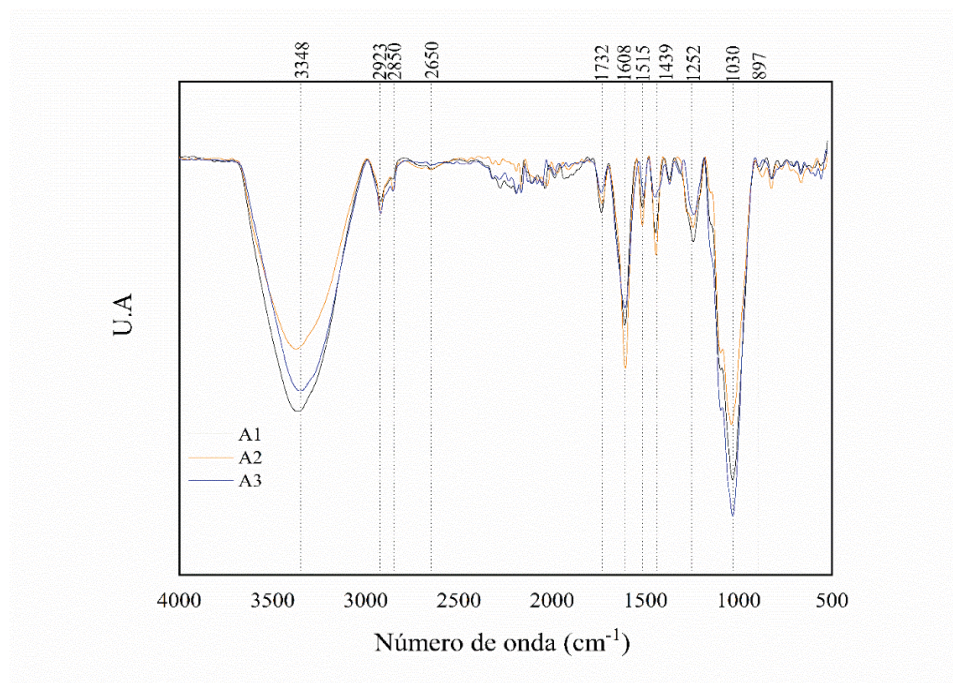


Figura 2. Espectros FTIR de fibras de coco. A1) variedad Típico, A2) variedad Táparo, A3) variedad Híbrido.

Como se muestra en la Figura 2, la mayor intensidad de las bandas a 2850 cm^{-1} en la variedad A2 podría atribuirse a una mayor concentración de lignina y otros materiales no celulósicos como la cera (Turki *et al.*, 2020). Además, se observan diferencias en la región entre 1200 y 800 cm^{-1} , área correspondiente a la presencia de carbohidratos: en particular, la variedad A3 muestra un pico más pronunciado en la banda de 1030 cm^{-1} , asociada con la celulosa (Aridi *et al.*, 2020; Moshi *et al.*, 2020), lo que sugiere un mayor contenido de este carbohidrato en dicha variedad.

Este resultado es coherente con los valores de resistencia a la tensión, ya que la variedad A3 presentó el valor más alto. Estudios previos han indicado que una mayor presencia de celulosa en una fibra vegetal se correlaciona con una mayor resistencia a la tensión (Bui *et al.*, 2020).

Adsorción de agua

La adsorción de agua para los 3 tratamientos estuvo entre el 98 y el 104 %, en este análisis no existe diferencia significativa entre los tratamientos, es decir que las fibras pertenecientes a las tres variedades de coco tienen una adsorción de agua semejante. El porcentaje de adsorción obtenido es similar a lo reportado para fibras de coco en adsorción de agua y adsorción de metales pesados como el plomo, estos estudios reportan porcentajes que van desde un 92 hasta un 98 % de adsorción de líquido (Rincón *et al.*, 2016; Bazán, 2017). Al comparar este resultado con análisis de otras fibras como las de bagazo de caña y tusa de maíz, las fibras de coco poseen un mayor porcentaje de adsorción de agua debido a su composición química que está constituida por una gran cantidad de celulosa (40 – 43 %) que está formada por unidades de glucosa en cuya estructura hay presencia de grupos hidroxilo (-OH) libres, los cuales interactúan formando enlaces de hidrógeno con el agua, lo que explica en última instancia el aumento de la adsorción de agua en estas fibras. En fibras naturales, el incremento del contenido de celulosa en una fibra natural influye positivamente en la adsorción de agua, mientras que la presencia de una capa exterior de aceite natural, cera y/o grasa impide que las moléculas de agua penetren en el interior de la fibra disminuyendo el porcentaje de adsorción (Mishra & Basu, 2020; Begum *et al.*, 2021).

A pesar de que la fibra de coco tiene un elevado porcentaje de adsorción, estudios evidencian que el uso de este material como matriz de refuerzo confiere al material compuesto porcentajes de adsorción menores en comparación a otros materiales naturales. Pradeep, *et al.* (2022) elaboraron un bioplástico (BP) reforzado con fibra de coco (CF-BP) y otro con quitina (CH - BP) para estudiar sus propiedades físicas y mecánicas, donde obtuvo que la adsorción de agua más alta fue para BP con un 74 %, seguida de 54 % para CH - BP y 45 % para CF - BP, concluyendo que el uso de materiales de refuerzo como la fibra de coco ayudan a mejorar las propiedades de adsorción de agua en compuestos poliméricos.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El comportamiento de la estabilidad térmica de las fibras de las tres variedades de coco se estudió utilizando las curvas de la derivada del peso, como se muestra en la Figura 3. Se detectaron dos etapas de degradación durante el estudio de la estabilidad térmica de estos materiales lignocelulósicos: en la degradación inicial, los picos máximos para las tres variedades de coco se ubicaron en $44,47 \pm 0,66$ °C (A1), $50,62 \pm 0,76$ °C (A2) y $39,50 \pm 0,58$ °C (A3), dentro de un intervalo de temperatura de 24 a 125 °C: estos picos de degradación podrían deberse a la evaporación de la humedad y las sustancias volátiles presentes en las fibras de coco, dado que las fibras naturales son bastante hidrófilas, están sujetas a un proceso de deshidratación en el que se libera el agua absorbida.

El segundo pico de degradación se ubicó entre una temperatura de 190 °C a 390 °C, donde se observaron picos máximos por encima de los 300 °C. La primera parte de este pico, entre 190 y 300 °C corresponde principalmente a la degradación de la hemicelulosa, con pérdida de peso de aproximadamente el 20 %. La pérdida de masa ocurrida entre 300 y 370 °C, cuyo valor fue de aproximadamente 34 a 35 %, correspondió principalmente a la despolimerización térmica de la celulosa, intervalo de temperatura en donde se ubicaron los picos máximos de degradación. En el caso de la muestra A1 fue de $330,81 \pm 0,57$ °C, la muestra A2 fue de $331,63 \pm 0,21$ °C y la muestra A3 fue de $325,23 \pm 3,30$ °C. La última etapa entre 360 y 590 °C posiblemente ocurre la degradación de los componentes de la celulosa junto con la descomposición de la lignina, que continúa por encima de los 600 °C (Basu *et al.*, 2017; Mishra & Basu, 2020; Khan *et al.*, 2022).

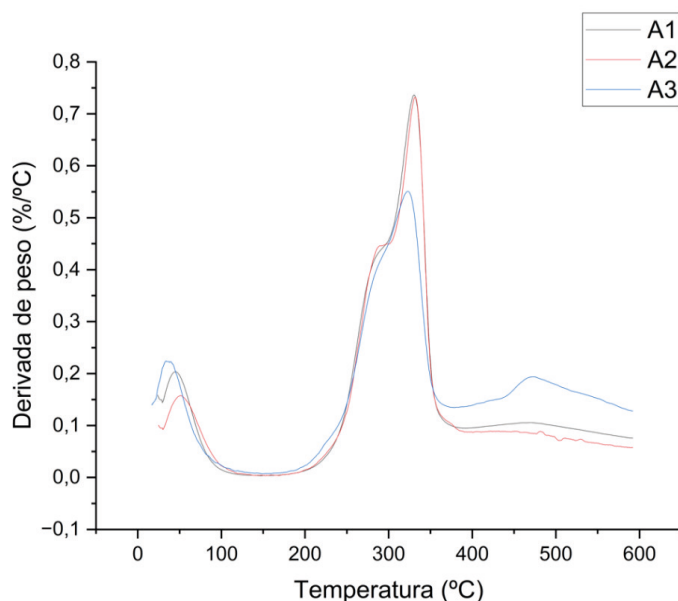


Figura 3. Curva TGA de la derivada del peso. Típico (A1), Táparo (A2) e Híbrido (A3).

Granulometría

En el Cuadro 2 se incluyen los porcentajes de fibra retenidos en cada tamiz, donde se observa que no hay diferencias significativas entre las muestras A1, A2 y A3. La mayor retención de partículas ocurrió en el tamiz 30, con un valor entre 24 y 25 %, correspondiente a tamaños de partícula menores o iguales a 600 μm . En el caso del tamiz 10, no hubo retención de fibra, lo que indica que aproximadamente una cuarta parte de las fibras tienen tamaños menores a 2000 μm y superiores a 600 μm . Además, se encontró que entre 65 y 67 % de las fibras tienen un tamaño menor a 2000 μm y superior a 250 μm , por lo tanto, menos del 35 % del material triturado tiene un tamaño menor a 250 μm .

Cuadro 2. Porcentajes de fibras de coco retenidas en cada tamiz.

Porcentaje de fibra retenida en cada tamiz	Tratamiento		
	A1 (%)	A2 (%)	A3 (%)
10	0	0	0
30	25,14 $\pm$ 0,17 ^a	24,81 $\pm$ 0,06 ^b	24,53 $\pm$ 0,08 ^b
40	16,35 $\pm$ 0,16 ^b	16,81 $\pm$ 0,02 ^b	16,23 $\pm$ 0,12 ^b
50	11,22 $\pm$ 0,10 ^a	10,17 $\pm$ 0,07 ^c	10,81 $\pm$ 0,07 ^b
60	14,51 $\pm$ 0,04 ^b	15,20 $\pm$ 0,04 ^a	13,23 $\pm$ 0,07 ^c
70	10,16 $\pm$ 0,04 ^b	9,69 $\pm$ 0,04 ^c	11,47 $\pm$ 0,06 ^a
Fondos	22,31 $\pm$ 0,04 ^b	23,05 $\pm$ 0,04 ^a	22,90 $\pm$ 0,04 ^a
Total	99,71 $\pm$ 0,25 ^a	99,73 $\pm$ 0,15 ^a	99,18 $\pm$ 0,20 ^b

Medias dentro de una columna seguida de la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

Estudios realizados por Chaudemanche *et al.* (2018) reportan que en la fabricación de materiales compuestos de madera y plástico es adecuado adicionar fibras con tamaños de 250 μm , ya que esto permite alcanzar altas propiedades mecánicas. Sin embargo, investigaciones realizadas por Awad *et al.* (2021) encontraron que al adicionar bajos contenidos de fibra de palma datilera (entre 10 y 20 % en peso), es adecuado utilizar tamaños de partícula $\leq 125 \mu\text{m}$, dado que esto permite obtener materiales compuestos de madera y plástico con alta resistencia a la tracción. No obstante, al implementar altas concentraciones de fibra (entre 30 y 40 % en peso), es conveniente usar tamaños de partícula entre 250 y 500 μm .

Relación de aspecto

La relación de aspecto hace referencia a un valor adimensional obtenido de la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro (L_f/D_f) (Gallo, 2013). Este factor es decisivo y proporciona un análisis más concluyente del comportamiento mecánico de un material compuesto, en comparación con el uso exclusivo de la longitud de la fibra como elemento de análisis (Chaudemanche *et al.*, 2018). En términos generales, se ha observado que la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia de los materiales compuestos tienden a mejorar cuando la relación de aspecto de las fibras es mayor, además, a medida que el diámetro de la fibra disminuye, la probabilidad de encontrar defectos que puedan propagarse durante el proceso de manufactura o carga también se reduce (Zhou *et al.*, 2022).

El Cuadro 3 resume los resultados obtenidos de la determinación de la relación de aspecto (L/D) de las fibras de coco. Estos resultados permiten inferir si las fibras pudieran ser empleadas como material particulado o de refuerzo. Según lo señalado por Navia *et al.* (2013), cuando la relación de aspecto es menor a 10, las fibras son adecuadas para ser utilizadas como relleno, mientras que valores superiores a 10 indican que las fibras actúan como refuerzo. Con base en esta clasificación, se concluye que las fibras de coco de las tres variedades retenidas en los tamices 40 y 60 podrían ser empleadas como material de refuerzo en una matriz para materiales compuestos, dado que presentan una relación de aspecto superior a 10.

Cuadro 3: Resumen de la relación aspecto.

Variedad	A1	A2	A3
Relación aspecto (tamiz 40)	15,23 $\pm$ 3,53 ^a	13,81 $\pm$ 2,76 ^b	13,32 $\pm$ 2,79 ^b
Relación aspecto (tamiz 60)	14,24 $\pm$ 3,45 ^{ab}	14,61 $\pm$ 2,66 ^a	13,83 $\pm$ 2,50 ^b

Medias dentro de una columna seguida de la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$)

CONCLUSIONES

La variedad Híbrido exhibió los rangos más altos de resistencia máxima a la tensión y módulo de elasticidad, lo que sugiere su potencial para proporcionar refuerzo estructural en materiales compuestos poliméricos. Por otro lado, la variedad Típica mostró una elongación máxima significativa en el punto de rotura, lo que podría ser valioso en aplicaciones que requieran cierto grado de flexibilidad. La prueba de absorción de agua mostró que las fibras pertenecientes a las tres variedades de coco tuvieron una alta capacidad de absorción de agua fruto de su composición química, dado que contiene una alta cantidad de celulosa (40 – 43 %), la cual está formada por unidades de glucosa en cuya estructura hay presencia de grupos hidroxilo (-OH) libres capaces de interactuar con las moléculas de agua. Respecto a la prueba de granulometría, esta indicó que entre 65 y 67 % de las fibras tuvieron un tamaño menor a 2000 μm y superior a 250 μm con una relación de aspecto por encima de 10, lo cual indica que estas fibras pueden ser utilizadas como material de refuerzo en la fabricación de compuestos. Finalmente, el estudio termogravimétrico reveló la estabilidad térmica de las fibras, con dos etapas de degradación observadas. Esta característica es esencial para garantizar la integridad del material compuesto en condiciones de procesamiento y servicio.

En general, se concluye que las fibras de coco estudiadas presentan propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas favorables, lo que las hace aptas como matriz de refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica. Este hallazgo ofrece oportunidades significativas para su aplicación en diversas industrias, donde se requieran materiales ligeros, resistentes y sostenibles.

REFERENCIAS

- ARIDI, AIDA-SAFINA; LING, CHIN-NYUK; ISHAK, NUR-AKMAL; NOR-NADIAH, MOHAMMAD-YUSOF; AHMED, MOHAMED-FIKRY & YUSOF, YUS-ANIZA. Structural FTIR analysis of cellulose functional groups isolated from *Leucaena leucocephala* pods using different bleaching agents. *AgriRxiv*, 2020, 20203561010. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2020.00026>
- AWAD, SAID; HAMOUDA, TAMER; MIDANI, MOHAMAD; ZHOU, YONGHUI; KATSOU, EVINA; FAN, MIZI. Date palm fibre geometry and its effect on the physical and mechanical properties of recycled polyvinyl chloride composite. *Industrial Crops and Products*, v. 174, 2021, p. 114172. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114172>
- AZANAW, AKLILU; KETEMA, ASNAKE. Extraction and Characterization of Fibers from Ethiopian Finger Euphorbia (*Euphorbia Tirucalli*) Plants. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 15, 2022, p. 11885-11895. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2046674>
- BASU, GAUTAM; MISHRA, LEENA; SAMANTA, ASHIS. Investigation of Structure and Property of Indian Cocos nucifera L. Fibre. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, v. 98, n. 2, 2017, p. 135-140. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40034-017-0096-x>
- BAZÁN-SALAS, OSCAR-EDUARDO. Adsorción de Plomo de agua de efluentes mineros utilizando Bagazo de Caña, Tusa de Maíz, y Fibra de Coco [Trabajo de grado]. Trujillo (Perú): Universidad Alas Peruanas, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2017, p. 51. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/1717>
- BEGUM, HOSNE ARA; TANNI, TANIMA RAHMAN; SHAHID, MD ABUL. Analysis of water absorption of different natural fibers. *Journal of Textile Science and Technology*, 2021, vol. 7, n. 4, p. 152-160. 10.4236/jtst.2021.74013
- BELAADI, AHMED; BEAZI, ABDERREZAK; BOURCHAK, MOSTEFA; SCARPA, FABRIZIO; ZHU, CHENCHEN. Thermochemical and statistical mechanical properties of natural sisal fibres. *Composites Part B: Engineering*, v. 67, 2014, p. 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.029>
- BUI, H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; & LEVACHER, D. Determination and review of physical and mechanical properties of raw and treated coconut fibers for their recycling in construction materials. *Fibers*, v. 8, n. 6, 2020, p 37. <https://doi.org/10.3390/fib8060037>
- CAJIAO, ELSA-SUSANA; VARGAS, CESAR-AUGUSTO; CERÓN-MOSQUERA, ALCY-RENE; VILLADA, HECTOR-SAMUEL. Influencia de la molienda de fibra de fique sobre propiedades mecánicas de un compuesto biodegradable. *Agronomía Colombiana*, v. 34, n. 1. 2016, p. 84-85. <http://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n1supl.57877>
- CHAUDEMANICHE, SAMUEL; PERROT, ARNAUD; PIMBERT, SYLVIE; LECOMPTE, THIBAUT; FAURE, FLORENT. Properties of an industrial extruded HDPE-WPC: The effect of the size distribution of wood flour particles. *Construction and Building Materials*, v. 162, 2018, p. 543-552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.061>
- CHOKSHI, SAGAR; PARMAR, VIJAY; GOHIL, PIYUSH; CHAUDHARY, VIJAYKUMAR. Chemical composition and mechanical properties of natural fibers. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 10, 2022, p. 3942-3953. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848738>
- CURY, KATIA; AGUAS, YELITZA; MARTINEZ, ANA; OLIVERO, RAFAEL; CHAMS, LINDA. Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, v. 9, n. S1, 2017, p.122-132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>

- DHARMARATNE, PRASAD-DHAMMIKA; GALABADA, HARSHA; JAYASINGHE, RANDIKA; NILMINI, RENUKA; HALWATURA, RANGIKA. Characterization of Physical, Chemical and Mechanical Properties of Sri Lankan Coir Fibers. *Journal of Ecological Engineering*, v. 22, n. 6, 2021.
<https://doi.org/10.12911/22998993/137364>
- FERREIRA, A.; COSTA, A.; FLORES, L.; BAIA, R.; MORENO, S; MORAIS, M. Caracterização energética da fibra da casca do coco com posterior produção de briquete. In *Congresso brasileiro de engenharia química*, XXI. Fortaleza (Brasil): Universidade do Estado do Amapá, Colegiado de Engenharia Química, 2016, p. 3-8.
- GALLO-ARCINIEGAS, LINA P.; GONZÁLEZ-PEÑUELA, GIOVANNI; CARRILLO-LEÓN, JULIAN. Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, v. 23, n. 1, p. 117-133.
<http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n1/v23n1a08.pdf>
- GOBERNACIÓN DEL CAUCA. Gobierno Departamental impulsa el fortalecimiento de la cadena productiva del coco en la Costa Pacífica del Cauca. Junio 2021. <https://www.cauca.gov.co/Prensa/SaladePrensa/Paginas/Gobierno-Departamental-impulsa-el-fortalecimiento-de-la-cadena-productiva-del-coco-en-la-Costa-Pac%C3%ADfica-del-Cauca.aspx> [consultado febrero 15 de 2023].
- HERNÁNDEZ-VIDAL, N.E.; LÓPEZ-BAUTISTA, V.; MORALES-MORALES, V.; MÉNDEZ-ORDÓÑEZ, W.; CALDERÓN OSORIO, E.S. Caracterización química de la Fibra de Coco (*Cocus nucifera* L.) de México utilizando Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR). *Ingeniería Y Región*, v. 20 n. 1, 2018, p. 67-71.
<https://doi.org/10.25054/22161325.1914>
- KHAN, ANISH; VIJAY, R.; SINGARAVELU, LENIN; SANJAY, M. R.; SIENGCHIN, SUCHART; JAWAID, MOHAMMAD; ASIRI, ABDULLAH. M. Extraction and characterization of natural fibers from *Citrullus lanatus* climber. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 2, 2022, p. 621-629.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1758281>
- LAVERDE, V.; MARIN, A.; BENJUMEA, J.M.; ORTIZ, M.R. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: a review. *Construction and Building Materials*, v. 340, 2022, p. 127729.
<https://doi-org.acceso.unicauca.edu.co/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>
- MARVILA, M.T.; ROCHA, H.A.; DE AZEVEDO, A.R.G.; COLORADO, H.A.; ZAPATA, J.F.; VIEIRA, C.M.F. Use of natural vegetable fibers in cementitious composites: Concepts and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 6, 2021, p. 1-24.
<https://doi.org/10.1007/s41062-021-00551-8>
- MISHRA, LEENA; BASU, GAUTAM. Coconut fibre: its structure, properties and applications. In *Handbook of Natural Fibres*. Woodhead Publishing, 2020, p. 231-255.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818398-4.00010-4>
- MORENO, LUIS-EDGAR; TRUJILLO, EFRAÍN; OSORIO, LINA-ROCIO. Estudio de las características físicas de haces de fibra de *Guadua Angustifolia*. *Scientia et Technica*, v. 1, n.34,2007, p. 2.
- MOSHI, ARUL; RAVINDRAN, D.; BHARATHI-SUNDARA, S.; INDRAN, S.; SARAVANAKUMAR, S.S.; LIU, YUCHENG. Characterization of a new cellulosic natural fiber extracted from the root of *Ficus religiosa* tree. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 142, 2020, p. 212-221.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.094>
- MU, BINSHAN; TANG, WEI; LIU, TANG; HAO, XIAOLONG; WANG, QINGWEN; OU, RONGXIAN. Comparative study of high-density polyethylene-based biocomposites reinforced with various agricultural residue fibers. *Industrial Crops and Products*, v. 172, 2021, p. 114053.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114053>
- MUÑOZ-VELEZ, MARIO-FERNANDO; HIDALGO-SALAZAR, MIGUEL-ANGEL; MINA-HERNANDEZ, JOSE-HERMINSUL. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. *Influencia de la modificación superficial*. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, v. 12, n. 2, 2014, p. 60-70.
- NAJEEB, M.I.; SULTAN, M.T.H.; ANDOU, Y.; SHAH, A.U.M.; EKSILER, K.; JAWAID, M.; ARIFFIN, A.H. Characterization of silane treated Malaysian Yankee Pineapple AC6 leaf fiber (PALF) towards industrial applications. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 3, 2020, p. 3128-3139.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.058>

- NAVIA, DIANA-PAOLA; VILLADA, HÉCTOR-SAMUEL; AYALA, ALFREDO-ADOLFO. Evaluación mecánica de bioplásticos semirrígidos elaborados con harina de yuca. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, v. 11, 2013, p. 77-84.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000300009
- PRADEEP, MANU; BINOY, RAHUL-FRANCIS; YASWANTH, S.; PULLAN, THANKACHAN; JOSEPH, MATHEW. Investigations on chitin and coconut fiber reinforcements on mechanical and moisture absorption properties of corn starch bioplastics. *Materials Today: Proceedings*, v. 58, 2022, p. 65-70.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.585>
- RAO, KURALI-MOHAN; RAO, MOHANA. Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite structures*, v. 77, n. 3, 2007, p. 288-295.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.07.023>
- RINCÓN, J.; RINCÓN, P.; TORRES, E.; MONDRAGÓN, A., SÁNCHEZ, M.; ARANA, A.; JIMÉNEZ, E. Caracterización físicoquímica y funcional de la fibra de mesocarpio de coco (*Cocos nucifera* L.). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, v. 1, n. 2, 2016, p. 279-284.
- TRUJILLO-SÁNCHEZ, ANA-FERNANDA; ARIAS-MAYA, LUZ-STELLA. El coco, recurso renovable para el diseño de materiales verdes. *Entre ciencia e ingeniería*, v. 7, n. 14, 2013, p. 93-100. Recuperado de:
<https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/637>
- SARAVANAN, R; GNANAVEL, C. Synthesis and characterization of treated banana fibers and selected jute fiber based hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, v. 21, 2020, p. 988-992.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.143>
- SARKI, J.; HASSAN, S.B.; AIGBODION, V.S.; OGHENEVWETA, J.E. Potential of using coconut shell particle fillers in eco-composite materials. *Journal of alloys and compounds*, v. 509, n. 5, 2011, p. 2381-2385.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.025>
- SIVA, R.; KUMAR, K.N.; MUPPARAJU, S. Study on physicochemical properties and morphology of surface-modified and raw *Coccinia grandis* natural fiber. *Materials Today: Proceedings*, v. 47, 2021, p. 4454-4458.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.312>
- TURKI, ARWA; OUDIANI, ASMA-EL; MSAHLI, SLAH; SAKLI, FAOUZI. Infrared spectra for alfa fibers treated with thymol. In *International Conference of Applied Research on Textile and Materials*. Cham: Springer International Publishing. 2022, p. 268-275.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-08842-1_43
- UNITED STATES OF AMERICA. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (AOAC). ASTM E1131-08(2014): Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. West Conshohocken. Pennsylvania (USA): 2014.
- UNITED STATES OF AMERICA. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (AOAC). ASTM E11-17: Standard Specification for Woven Wire Test Sieves. West Conshohocken. Pennsylvania (USA): 2017.
- UNITED STATES OF AMERICA. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (AOAC). ASTM C1557-20: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. Pennsylvania (USA): West Conshohocken, 2020.
- VINOD, A.; SANJAY, M.R.; SIENGCHIN, S. Recently explored natural cellulosic plant fibers 2018-2022: A potential raw material resource for lightweight composites. *Industrial Crops and Products*, v. 192, 2023, p. 116099.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116099>
- KUMAR, SATHEES; RAJA, MUGESH. Processing and determination of mechanical properties of *Prosopis juliflora* bark, banana and coconut fiber reinforced hybrid bio composites for an engineering field. *Composites Science and Technology*, v. 208, 2021, p. 108695.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108695>
- ZHOU, N.; ZHAO, M.; XU, B.; XIE, L.; LIU, D.; QU, L.; HAN, W. Effects of fiber aspect ratio and fabrication temperature on the microstructure and mechanical properties of elastic fibrous porous ceramics by press-filtration method. *Ceramics International*. v. 49, n. 7, 2022, p. 11038-11046.2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.299>