

Extracción de fibras de celulosa a partir de residuos de pseudotallo de banano y su potencial aplicación en la industria papelera

Efraín Enrique Villegas-González ¹, Alba N. Ardila-A. ^{1,*}, Jesús Darío Hernández-Ciro ¹; Johan Steven Valencia-Duarte ², Erasmo Arriola-Villaseñor ³, Eduart A. Gutiérrez-Pineda ³, Cristian C. Villa ³

¹ Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER), Facultad de Ciencias Básicas Sociales y Humanas, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

² Laboratorio de investigación y Desarrollo Agroalimentario (LIDA), UNAD Universidad Nacional Abierta y a Distancia - Sede José Celestino Mutis, Bogotá, Colombia

³ Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Universidad del Quindío. Carrera 15 calle 12n, Armenia, Quindío.

* Autor de correspondencia: anardila@elpoli.edu.co

Desarrollo Sustentable (Gestión y Aprovechamiento de Residuos Sólidos). **Ponencia Virtual.**

Recibido: 16 de junio de 2023

Aceptado: 5 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: el creciente desarrollo de sectores industriales ha traído consigo grandes problemáticas socioambientales debido a la generación de altas cantidades de residuos sólidos orgánicos como los de la industria bananera. En este trabajo, se extrajeron y caracterizaron fibras del pseudotallo de banano del municipio de Girardota para analizar su potencial como insumo de la industria papelera. Para esto, se evaluaron diferentes condiciones mecánico-químicas para la extracción de fibras de celulosa y se caracterizaron por espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR), difracción de rayos X (DRX), microscopia electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA) y composición química. Los resultados de la composición química mostraron una disminución en el contenido de hemicelulosa y lignina principalmente, resultados coherentes con los identificados en los espectros evidenciándose la presencia de bandas de absorción en 1050 cm⁻¹ asignadas a la vibración del grupo C-O-C presente en unidades de glucopiranosas en moléculas de celulosa. DRX mostró que el amorfo de celulosa-I no fue alterado durante la extracción. Los resultados TGA revelaron que la estabilidad térmica aumentó para la celulosa aislada, y la degradación máxima se dio entre 300-400°C. SEM reveló cambios en la estructura morfológica, obteniendo fibras con mejores características en medio alcalino. Las muestras fueron comparadas respecto a fibras de celulosa usadas por la empresa Kimberly Clark evidenciándose que el tratamiento en medio alcalino es la mejor alternativa para la extracción de fibras similares a las usadas en el sector papelero.

Palabras clave: Pseudotallo del banano, análisis morfológico, celulosa, deslignificación.

Extraction of cellulose fibers from banana pseudostem residues and their potential application in the paper industry

Abstract: the growing development of industrial sectors has brought with it great socio-environmental problems due to the generation of high amounts of organic solid waste such as those of the banana industry. In this work, fibers from the banana pseudostem of the Girardota municipality were extracted and characterized to analyze its potential as an input for the paper industry. For this, different mechanical-chemical conditions for the extraction of cellulose fibers were evaluated and characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TGA) and chemical composition. The results of the chemical composition showed a decrease in the hemicellulose content, mainly lignin, and are consistent with those identified in the spectra, evidencing the presence of absorption peaks at 1050 cm⁻¹ assigned to the vibration of the C-O-C group present in units of glucopyranose into cellulose molecules. XRD showed that the cellulose-I amorphous was not altered during the extraction, and that the best crystallinity index was obtained in alkaline medium. The TGA results revealed that the thermal stability increased for the isolated cellulose, and the maximum degradation occurred between 300-400°C. SEM revealed changes in the morphological structure, obtaining fibers with better characteristics in alkaline medium. The samples were compared with respect to the cellulose fibers used by the Kimberly Clark company, evidencing that the treatment in alkaline medium is the best alternative for the extraction of fibers and their application in different paper industry processes.

Keywords: Banana pseudostem, morphological analysis, cellulose, delignification.

Introducción

El mercado papelero representa uno de los sectores industriales de preeminencia a nivel global, en virtud de su rol trascendental en diversas facetas de la vida cotidiana, abarcando desde usos personales hasta comunicativos, entre otros. La lignocelulosa ostenta el papel primordial como fuente de materias primas con miras a la producción papelera,

beneficiándose de su elevada concentración de celulosa, componente de esencial en el proceso manufacturero. Este vínculo intrínseco conlleva a que la demanda de recursos arbóreos ejerza un impacto sustancial en el entorno ambiental, acarreado consigo una disminución de los recursos naturales y, por consiguiente, una perturbación en la homeostasis ecosistémica. En términos de índole económica, la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) reporta que el sector papelerero exhibió un incremento del 3.3% en su producción durante el año 2017, al tiempo que las exportaciones de productos papeleros ascendieron en un 24.3%. Estos resultados conllevan una contribución palpable al crecimiento de la economía a nivel nacional. En ese mismo período, el sector papelerero aportó un 4.6% al Producto Interno Bruto (PIB) industrial del país, propiciando la generación de más de 9000 oportunidades laborales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cadena de Banano., 2020), cabe destacar, además, que sus exportaciones alcanzaron países como Ecuador, Perú y el área centroamericana, consolidando así la fortaleza de la industria no solo en términos productivos sino también en el ámbito del consumo. En el contexto colombiano, las fuentes preeminentes y sostenibles de fibras empleadas en la manufactura de papel y cartón provienen principalmente de recursos fibrosos vírgenes derivadas de plantaciones forestales, el bagazo de caña de azúcar y las fibras recicladas (Medina, 2022).

Así, la actividad de la industria papelera contribuye a la deforestación global, aunque no sea la principal causa. Su funcionamiento está relacionado con la pérdida de recursos naturales debido a la explotación y eliminación de bosques vírgenes, reemplazándolos con plantaciones para obtener materia prima en la fabricación de papel. Por esta razón, varios estudios sugieren usar desechos agrícolas como fuente de fibras de celulosa en lugar de las fibras de madera (Santiago, Moreira, & Feijo, 2022) (Wu, Yin, & Xu, 2022). En este estudio, nos centramos en las fibras de residuos agrícolas de las plantaciones de banano, ya que estos han despertado un gran interés ambiental, social y económico, debido a que dichos residuos se convierten en alternativas para darle valor agregado. Investigaciones previas han demostrado que estas fibras podrían ser una alternativa viable a las fibras de madera. En Colombia, en los últimos 10 años, se ha producido un promedio anual de 1.72 millones de toneladas de banano. En 2017, la producción fue de 1.96 millones, con 1.3 millones de toneladas (66%) en la región de Urabá Antioqueño y 657 mil toneladas (34%) en el núcleo Magdalena-Guajira (Informe sectorial cadena productiva del banano, 2022). Estos datos sugieren que toneladas de residuos podrían ser procesadas para usos valiosos en distintas industrias, al mismo tiempo que se evitan impactos negativos en el medio ambiente y la degradación de los bosques naturales.

En su totalidad la planta de banano está en capacidad de proveer fibras de diferentes resistencias, color, belleza y longitudes discretas que se pueden utilizar en diversas aplicaciones, por esto los desechos de banano se consideran un biorecurso potencial ya que el cultivo de banano provee grandes cantidades de biomasa después de su cosecha y estos desechos vertidos pueden aportar diferentes tipos de fibra (Vergara, 2022). Específicamente, la planta de banano se caracteriza por tener un alto contenido de celulosa, según un estudio realizado para cuatro tipos de especies el porcentaje de celulosa puede estar entre el 48 y el 60% para las extracciones de fibra a partir del pseudotallo. Lo que las convierte una fuente fibras sostenible, abundante y económica (Sawarkar, Kirti, & Tagade, 2022). De esta manera dichos desechos se pueden convertir en un material potencial de materia prima para la industria papelera y la utilización de recursos agroindustriales generándoles un valor agregado a estos desechos dispuestos como basura (Meng, Wang, & Du, 2019).

Se han desarrollado numerosos estudios enfocados en explorar procesos para la extracción de fibras de residuos de banano. Lo más empleados son de tipo mecánicos, químicos y enzimáticos (Mohd, Roslan, & Saallah S, 2022) que pueden ser usados de forma independiente o en conjunto (Llangovan, Guna, & Prajwal, 2020). En los procesos químicos se han llevado a cabo extracciones con reactivos como ácido sulfúrico, bisulfito, hidróxido de sodio, sulfatos, cloro, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno y oxidación con el reactivo TEMPO posteriores (Nageswara & Lakavat, 2021) Algunas investigaciones revelan que los tratamientos con ácidos tienen baja recuperación de sólidos indicando alta solubilización del material, sin embargo, se han alcanzado rendimientos hasta el 82 % utilizando ácido sulfúrico al 25%, obteniéndose altos contenidos de celulosa en comparación con tratamientos con peróxido de hidrógeno, no obstante este pretratamiento es muy efectivo para eliminar totalmente el contenido de hemicelulosa lo que permite una mayor accesibilidad a la celulosa del material. Concentraciones severas de ácido (H₂SO₄) hasta un 25%, pueden dar paso a concentraciones de celulosa de 66.28 %, 3.97% de hemicelulosa y 31,15 % de lignina, esto comparado con otros pretratamientos que denota una disminución de celulosa significativa lo que sugiere una degradación de la misma en estos tratamientos severos (Ezeamaku & Eze, 2022). El comportamiento del pretratamiento con álcali se comporta de forma muy similar al pretratamiento ácido, con la diferencia que con este se pueden obtener rendimientos del 85 % utilizando hidróxido de sodio al 25 %, por otro lado, los tratamientos con peróxido de hidrógeno eliminan la

hemicelulosa completamente y posee un rendimiento del 74% (Shimizu, Monteiro, & Ghiraldi, 2018). Los tratamientos con hidróxido de sodio al 25 % y peróxido de hidrógeno al 8% aumentan la concentración alrededor del 75% en comparación con el pretratamiento con ácido, con base a esto se determina que estos dos pretratamientos son más eficientes para extraer altos contenidos de celulosa en biomásas a partir de residuos de plátano. Una de las metodologías químicas más conocidas es la oxidación mediada por TEMPO, donde comúnmente el sistema oxidante primario es NaClO, con NaBr como catalizador, este sistema de amplia aplicación se puede utilizar para la extracción de celulosa de todo tipo de biomásas (Ezeamaku & Onukwuli, 2022)

De acuerdo con los resultados alentadores publicados en la literatura en cuanto al uso de procesos químicos y, teniendo en cuenta que en Colombia no se han realizado estudios de extracción de fibras de residuos de pseudotallo para evaluar su factibilidad de usarlas como material de refuerzo en la industria papelera. En el presente trabajo, se llevó a cabo un diseño experimental simétrico, implementando un proceso por hidrólisis con H₂O₂ y NaOH para la extracción de fibras de celulosa a partir del pseudotallo de banano. Las fibras obtenidas se caracterizaron para determinar sus principales propiedades estructurales y morfológicas a través de diferentes análisis químicos como DRX, TGA, FTIR y SEM a fin de determinar las posibles aplicaciones de dichas fibras como material de refuerzo en la industria papelera y compararlas con las fibras usadas comúnmente en esta industria a nivel comercial.

Metodología

Recolección y acondicionamiento de las muestras

La recolección de muestras de pseudotallo del banano Doménico se realizó en la vereda el Barro, municipio de Girardota en el departamento de Antioquía. Los pseudotallos se cortaron en rodajas y se secaron al sol durante 120 horas eliminando parte de la humedad del material. Posteriormente se secaron por convección en un horno eléctrico a 50°C durante 72 horas para eliminar el agua en su totalidad. A continuación, con ayuda de tijeras se cortaron en trozos de 2 cm de ancho por 5 cm de largo y seguidamente se trataron en un molino de cuchillas hasta obtener un polvo fino. Finalmente, el sustrato molido se tamizó en un tamiz ASTM malla 80 y se almacenó en bolsas plásticas para su posterior tratamiento y análisis fisicoquímico.

Extracción de la celulosa del pseudotallo de la planta del banano mediante tratamientos químicos

Se llevó a cabo la hidrólisis alcalina para lo cual la biomasa seca en polvo (BPS) se sometió en una proporción 1 mL de NaOH/0.1g de biomasa, usando dos concentraciones diferentes de NaOH (25% y 30% cuyos códigos son FPD-Na25 y FPD-Na30, respectivamente), lo anterior bajo agitación en ultra-turrax (Heidolph RZR2021) a temperatura ambiente, 550 rpm por 2 horas. Luego se dejó el sistema en reposo a temperatura ambiente por 12 horas, posteriormente se sometió en una autoclave durante 90 minutos a 120 °C y 20 psi, seguidamente la muestra se filtró, lavó (con agua desionizada hasta obtener un pH de 7.0 en el agua de lavado) y se secó a 60°C durante 12 horas. Para el tratamiento con H₂O₂ (código FPD-H08) la relación respecto a la biomasa se mantuvo igual a las condiciones alcalinas y se omitió la autoclave. A las fibras obtenidas se les realizó blanqueamiento empleándose una solución de peróxido alcalino adicionándose a las fibras gota a gota una solución de H₂O₂ al 10% hasta humedecer la fibra seca, posteriormente se agregó gota a gota una solución de NaOH al 8% hasta obtener un pH de aproximadamente 11 y se dejó el sistema en agitación constante por 60 minutos, se realizó un último lavado con agua desionizada hasta pH de 7 y se secaron las fibras durante 12 horas a 60°C en un horno de convección. Con fin de realizar comparaciones con algunas fibras comerciales utilizadas por la empresa Kimberly Clark, también se realizó la caracterización de dos tipos de fibras (FKEU y FKPN), las cuales son usadas para la fabricación de productos comercializados por dicha empresa. En la **Tabla 1**, se indica el código para las fibras evaluadas de acuerdo con los diferentes procedimientos fisicoquímicos y mecánicos aplicados.

Cuantificación de extraíbles y carbohidratos

La cuantificación de extraíbles y carbohidratos, se realizó por gravimetría, para lo cual se utilizó un montaje de extracción Soxhlet en el que se tomaron aproximadamente 5 gramos de cada muestra se envolvieron en papel filtro y se conectaron a un matraz con 250 mL de agua destilada grado HPLC en duplicado. Todo el sistema se conectó a un condensador y se sometió a calentamiento en una plancha durante 8 horas. El solvente se recuperó por rota

evaporación y los extraíbles se secaron a 105°C en un horno durante 2 días, las masas fueron obtenidas por peso constante. El proceso se repitió nuevamente con alcohol etílico grado USP. Posterior a esto se determinó la composición química de las fibras, inicialmente se calculó la cantidad de extraíbles, tanto en agua como en alcohol, empleando la norma NREL/TP -510-42619, la lignina se determinó a partir de la norma NREL/TP-510-42618, para finalizar la composición química, se cuantificó holocelulosa y celulosa a partir del método ASTM D-1104. Posteriormente, se realizaron las caracterizaciones que permitieron obtener información sobre las propiedades estructurales y morfológicas de las fibras de celulosa obtenidas, de acuerdo con diferentes técnicas.

Análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier por Reflectancia Total Atenuada (ATR-FTIR)

Los espectros ATR-FTIR se obtuvieron en un espectrofotómetro IR Shimadzu IRAffinity-1S. Las lecturas se realizaron en un rango de número de onda entre 800 a 4000 cm^{-1} .

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías de las diferentes fibras se obtuvieron en un microscopio electrónico de barrido asistido por emisión de campo JEOL FE-JSM-7100F, el cual funcionó con un voltaje de aceleración 15 kV, para lo cual, las muestras se dispusieron en una cinta de carbono de doble cara, recubiertas con oro.

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Los termogramas se recolectaron en un Analizador Térmico (TA Instruments) TGA Q500. Para lo cual se calentaron alrededor de 0.5 g de cada muestra en un rango de temperatura entre 30 y 500 ° C con una velocidad de calentamiento de 10 ° C /min. Se usó un crisol de porcelana bajo flujo de nitrógeno (100 mL /min).

Difracción de rayos X (XRD)

Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyeon 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\alpha = 1.541874$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner con giro de 4s. El paso fue de 0.05° y un tiempo por paso de 52s.

Resultados y Discusión

Cuantificación de extraíbles y carbohidratos

Los resultados de la Tabla 1 muestran la composición química principal de la materia prima y las fibras obtenidas. Luego de haber realizado el tratamiento físico para la obtención de la biomasa en polvo el rendimiento fue del 29.5%, presentando un 48.40 de celulosa, 12.57% de hemicelulosa y un 69.97% de holocelulosa, diferentes autores muestran una composición química similar y su variación puede deberse al tipo de pseudotallo en cuanto a su variedad y a la región geográfica de donde fue recolectada la muestra. El contenido final de celulosa obtenido en cada tratamiento implementado muestra resultados similares a los encontrados en diferentes investigaciones, así se obtuvo un 78.45% para el tratamiento con H_2O_2 al 8%, 90.32% para el tratamiento con NaOH al 25% y 88.68% para el tratamiento con NaOH al 30% [17]. Lo anterior indica que en todos los tratamientos propuestos se logró la ruptura de los enlaces hemicelulosa-lignina, permitiendo obtener altos porcentajes de celulosa, no obstante, el método que menor eficiencia presentó fue para la muestra FDP-H08 con H_2O_2 al 8% y esto se debe a que la accesibilidad del H_2O_2 a la fibra no fue la esperada por lo que al estabilizar la reacción requerirá un mayor tiempo de contacto de las fibras con la solución, para garantizar la descomposición completa del H_2O_2 [18]. Así mismo se puede observar que las fibras obtenidas del proceso con los tratamientos en medio alcalino presentaron porcentajes de celulosa similares e inclusive superiores respecto a las fibras usadas por Kimberly-Clark, esto se debe a que estas fibras son extraídas de pino y eucalipto, en los cuales su estructura favorece la extracción, mientras que la estructura del pseudotallo del banano pese a que presenta mayor incrustamiento en la matriz de hemicelulosas/lignina, los tratamientos mecánicos favorecieron el acceso a la celulosa. Añadido a esto se supone que la hemicelulosa, no logró de forma satisfactoria su transición de celulosa 1 a celulosa 2, que es la estructura cristalina de la celulosa más estable termodinámicamente, esto se respalda con el porcentaje de hemicelulosa encontrado para las muestras tratadas. De esta manera las fibras que presentaron mayor eficiencia en el

rendimiento de extracción de celulosa fueron las obtenidas en FPDNa-25 y FPDNa-30 con un porcentaje de celulosa de 90.2 y 88.68% respectivamente. De acuerdo con los rendimientos reportados en la misma tabla se observa que en general son altos, lo cual se le atribuyen principalmente a que la materia prima empleada tiene un bajo porcentaje de agua (18.15%), generando un aumento significativo en la cantidad de muestra inicial para los procesos de extracción de celulosa, lo cual también indica que la deslignificación fue óptima generando valores negativos para dicho carbohidrato.

Análisis por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier por Reflectancia Total Atenuada (ATR-FTIR)

La Figura 1 ilustra los espectros FTIR de los diferentes tipos de fibras obtenidas, la presencia de grupos similares en todas las muestras permitió inferir la conservación de la estructura química básica de la celulosa inclusive después de los tratamientos químicos. Acorde a los resultados de composición química, estos son coherentes con los identificados en los espectros FTIR evidenciándose la presencia de bandas de absorción en 1050 cm^{-1} asignado a la vibración del grupo C-O-C presente en unidades de glucopiranosas en moléculas de celulosa. También se identificaron vibraciones a 1640 cm^{-1} y 1240 cm^{-1} correspondientes a los grupos carbonilo de la hemicelulosa y compuestos fenólicos, respectivamente para la biomasa seca (BPS). Con los resultados de carbohidratos se observa que efectivamente son coherentes con los identificados en los espectros donde se encontró que la composición de la biomasa seca en polvo está representada en un 48% de celulosa, 60.96% de holocelulosa, 12.57% de hemicelulosa y 3.63% de lignina.

La banda a 1640 cm^{-1} está asociada al agua adsorbida en la celulosa, y la que aparece en 1380 cm^{-1} está relacionada a las vibraciones de flexión de los grupos C-H y C-O de los polisacáridos. La banda a 1200 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones de estiramiento asimétricas C-O-C asociadas con la celulosa tipo I. Por último, el espectro de la biomasa muestra una banda relativamente intensa alrededor de los 960 cm^{-1} , la cual se relaciona posiblemente a las interacciones entre los enlaces glucosídicos y las unidades de glucosa de la celulosa. Una vez la biomasa se trató con H_2O_2 se observan como las bandas asociadas a los diferentes compuestos de la matriz disminuyen, pero no significativamente, siendo muy acorde a lo encontrado con respecto al análisis químico donde se muestra que pese a que la eficiencia de este tratamiento fue alta la accesibilidad no lo fue debido a la conformación de la matriz del pseudotallo.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de las fibras obtenidas por diferentes procedimientos.

Código	Procedimiento	Rendimiento (%)	Humedad (%)	Extraíbles (%)			Carbohidratos (%)		
				Agua	Etanol	Lignina	Holocelulosa	Hemicelulosa	Celulosa
BPS	Biomasa- seca y molida	29.5	10.91	18.15	49.14	3.63	60.96	12.57	48.40
FPD-HO8	Fibra de Pseudotallo tratada con H_2O_2 8%	49.3	9.24	3.76	0.56	0.68	70.34	3.16	78.45
FPD-Na25	Fibra de Pseudotallo tratada con NaOH 25%	12.0	8.89	1.65	0.16	-12.13	93.59	3.27	90.32
FPD-Na30	Fibra de Pseudotallo Tratada con NaOH 30%	13.3	9.97	1.92	1.39	-17.60	92.91	4.24	88.68
FKEU	Kimberly Fibra corta-EU	-	10.22	2.04	7.21	0	84.91	7.39	77.52
FKPN	Kimberly Fibra larga-Pino	-	8.67	2.58	4.94	0	86.57	9.42	77.15

En el análisis infrarrojo para la muestra tratada con hidróxido de sodio al 25 y 30% con el que se ha obtenido mejor rendimiento y mayor deslignificación de la biomasa, el cual al compararlo con el análisis de carbohidratos es coherente al tener valores de lignina en negativo, lo que garantiza su deslignificación. Por otra parte, los picos sobre 1020 cm^{-1} y 1100 cm^{-1} se relacionan con la presencia de la celulosa, hemicelulosa y lignina, pero tal como se observan dichos picos disminuyen luego del tratamiento químico con H_2O_2 y NaOH, esto debido a que hubo una remoción del contenido orgánico que se atribuye a la pérdida de hemicelulosa y lignina, debido a los tratamientos químicos mecánicos. Todas las muestras revelan picos en números de onda de alrededor de 2900 cm^{-1} debido a la vibración de estiramiento en el grupo CH y CH_2 .

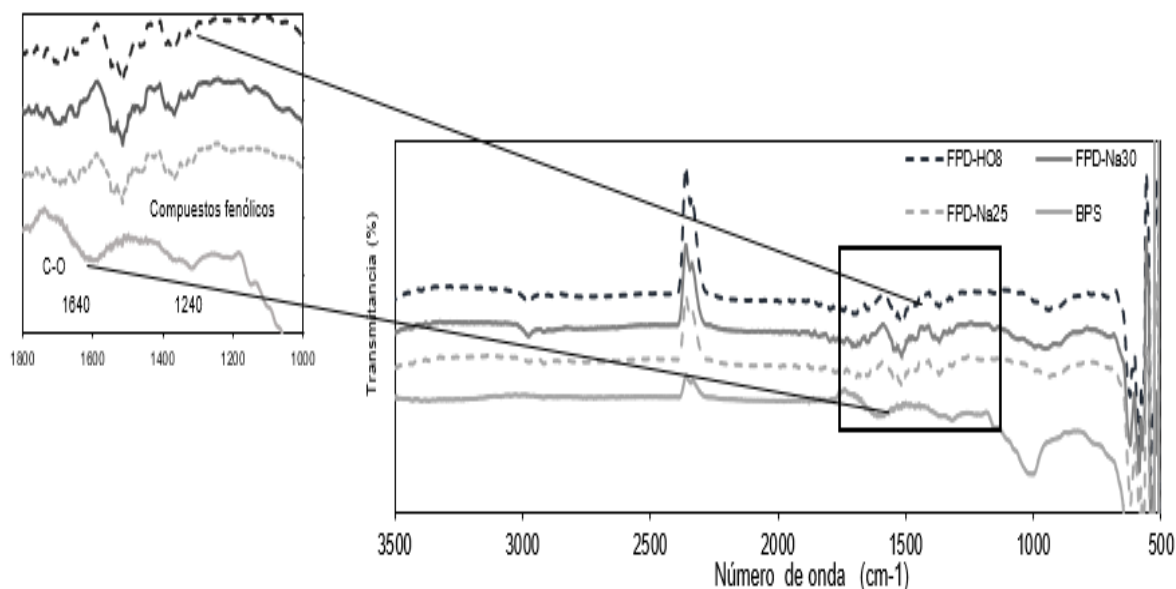


Figura 1. Análisis FTIR de biomasa sin tratar (BPS), biomasa tratada con H_2O_2 al 8% (FPD-H08), biomasa tratada con NaOH al 25% y 30% respectivamente (FPD-Na25 y FPD-Na30).

Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

Los análisis de DRX (Figura 2) se realizaron con el fin de determinar la presencia de materia de naturaleza cristalina y/o amorfa en las muestras tratadas químicamente.

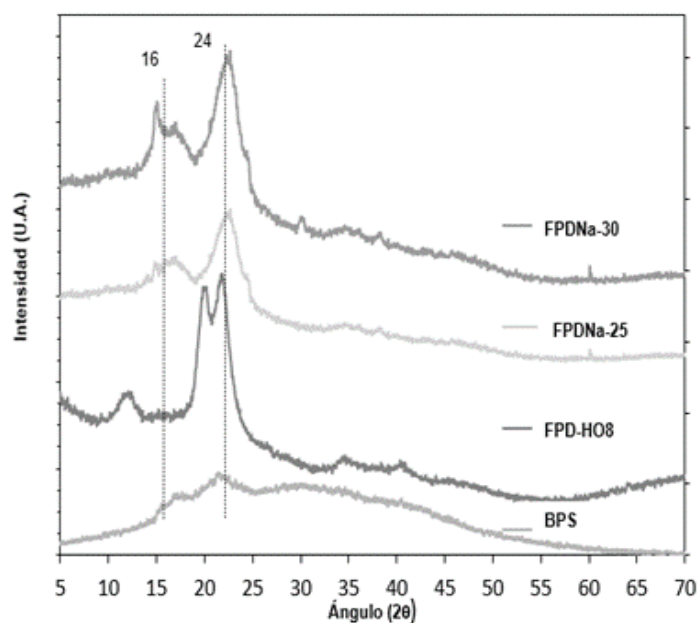


Figura 2. Patrones de DRX de biomasa sin tratar (BPS), biomasa tratada con H_2O_2 al 8% (FPD-H08), biomasa tratada con NaOH al 25% y 30% respectivamente (FPD-Na25 y FPD-Na30).

El DRX para la biomasa sin tratar (BPS) mostró la aparición de un pico muy débil a 22° del ángulo 2θ , lo anterior debido a que el alto contenido de lignina y hemicelulosa da amorficidad al material. Por otra parte, los patrones de DRX de las fibras tratadas químicamente mostraron picos similares característicos en valores 2θ alrededor de 14.7° y 22.5° típicos de la estructura de la celulosa [7, 14, 15]. Sin embargo, la muestra tratada con peróxido de hidrogeno (PPD-H08) mostró los planos cristalográficos reportados entre 14 a 22.5° del ángulo 2θ , con la diferencia de que en el ángulo de 16° se muestra otro pico de baja intensidad y ancho, característico y asociada a la presencia de componentes no cristalinos

como la lignina y hemicelulosa los cuales no fueron removidos o degradados con este tratamiento. Los patrones de difracción para las fibras tratadas en medio alcalino mostraron planos cristalográficos más definidos, siendo el patrón más relevante el correspondiente a la muestra FPDNa-30 con picos característicos en 14 y 22.5° del ángulo 2θ, los cuales tienen alta similitud con los difractogramas presentados por otros autores, estas características son acordes a la cristalinidad de la celulosa nativa conocida también como celulosa I. La nitidez y definición de dichos picos se asocia a que el proceso de blanqueamiento contribuyó a la eliminación de hemicelulosa, lignina y remoción en parte de la celulosa amorfa, además la aparición de un pequeño pico en 33° se asocia a que la celulosa estaba cubierta por este tipo de materiales no celulósicos y por eso no se evidenció en los otros patrones de difracción [5, 16, 17].

Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Las micrografías SEM permiten identificar algunos cambios en la morfología de la superficie de la pared celular en muestras de pseudotallo de banana sin tratar y tratadas con H₂O₂ y NaOH (Figura 3). La imagen SEM para la biomasa sin tartar (BPS) mostró una estructura compacta con masas densas que se atribuyen a la cohesión de hemicelulosa, lignina y otro tipo de materiales evidenciándose sobre la superficie la presencia de éstos como pequeños gránulos. Para la fibra tratada con peróxido de hidrogeno (FPF-H08) se observa una pequeña desorganización en la superficie del material lo cual es evidente morfológicamente en comparación con la biomasa no tratada, esto debido a que el tratamiento con peróxido de hidrogeno fue un poco agresivo y si bien hubo cierta remoción de hemicelulosa y lignina produjo la alteración superficial del material y dándose una pequeña fragmentación de la fibra. Para la biomasa tratada en medio alcalino (FPD-Na25 y FPD-Na30) se evidencia también un cambio morfológico en la superficie, sin embargo, texturalmente no se evidencian grandes cambios superficiales, esto se relaciona a que este tratamiento en medio alcalino favorece la accesibilidad a la celulosa haciendo que los procesos de deslignificación sean menos agresivos y por ende las estructuras de las fibras se conserve un poco más, sin embargo, las imágenes muestran que para la fibra FPD-Na30 se tiene un aspecto de mayor grosor y más uniforme, lo cual se asocia también a las pérdidas de lignina y hemicelulosa.

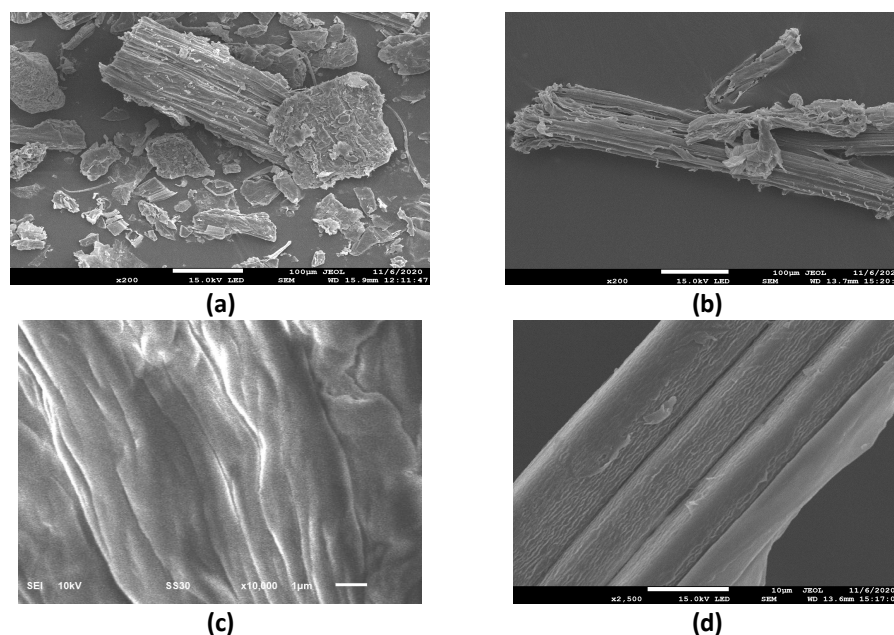


Figura 3. (a) Imágenes SEM de biomasa sin tratar (BPS), (b) biomasa tratada con H₂O₂ al 8% (FPD-H08), biomasa tratada con NaOH al 25% y 30% respectivamente ((c) FPD-Na25 y (d) FPD-Na30).

Análisis Termogravimétrico (TGA)

Las propiedades térmicas de la biomasa y fibras tratadas químicamente fueron evaluadas mediante análisis TGA (Figura 4). Estas propiedades son importantes para diversas aplicaciones y en especial si se desean emplear como material de refuerzo. Tanto para la biomasa sin tratar como la biomasa tratada presentaron tres regiones principales de pérdida de peso. La pérdida de peso inicial se da entre la región de 30 a 120 °C, la cual se debe principalmente a la evaporación

de la humedad, lo anterior debido a la presencia de hemicelulosa, lignina y otros componentes no celulósicos cuya naturaleza es hidrofílica lo que ayuda a mantener grandes cantidades de humedad. Para las muestras sin tratar y tratadas químicamente se presenta una segunda pérdida de peso muy brusca entre 200 y 400 °C, principalmente debido a la pérdida de hemicelulosa, y luego la lignina. La baja estabilidad térmica de la hemicelulosa se debe a la presencia de grupos acetilo. Se resalta el hombro definido sobre los 280 °C en la curva DTG para las muestras tratadas en medio alcalino lo que corrobora efectivamente la pérdida de hemicelulosa siendo más visible cuando se realizó el tratamiento con NaOH al 30%, por el contrario, para la muestra tratada con peróxido de hidrogeno dicho hombro no es evidente demostrándose así que tanto la hemicelulosa como la lignina posiblemente no se eliminaron completamente [3, 5, 6, 19, 20]. Finalmente, la tercera pérdida de peso para los materiales se presentó a una temperatura mayor a los 400 °C y aunque el decaimiento en la curva no es tan pronunciado si se puede resaltar que se dio la degradación de la celulosa. La principal degradación de la cadena celulósica se debe a varios pasos, como la despolimerización, la deshidratación y la descomposición de las unidades glucosídicas.

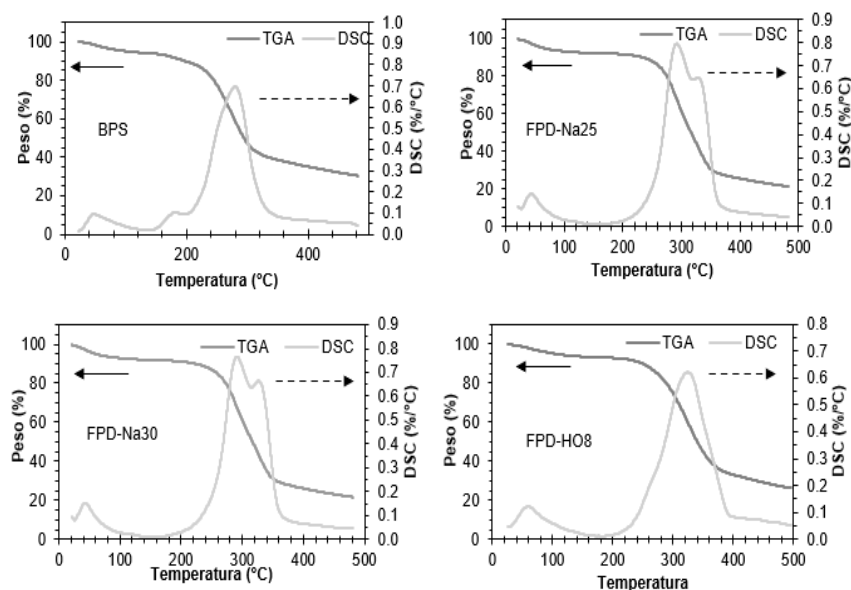


Figura 4. Termogramas de biomasa sin tratar (BPS), biomasa tratada con H_2O_2 al 8% (FPD-HO8), biomasa tratada con NaOH al 25% y 30% respectivamente (FPD-Na25 y FPD-Na30).

Conclusiones

Una evaluación detallada de los efectos de diferentes pretratamientos a las fibras aisladas del pseudotallo de banano mostró que los pretratamientos con peróxido de hidrogeno e hidróxido de sodio dieron como resultado una baja recuperación de sólidos siendo más evidente el tratamiento en el medio alcalino, sin embargo, fue este tratamiento el que más favoreció la eliminación en gran cantidad de hemicelulosa y lignina, por lo tanto, la remoción de los componentes de la biomasa expuso la celulosa, aumentando su accesibilidad. El análisis FTIR confirmaron que la mayoría de los componentes no deseados, como la lignina y la hemicelulosa, se eliminaron en el caso de las fibras tratadas. Por su parte las micrografías SEM revelaron el medio alcalino favoreció los procesos de deslignificación y por ende una mayor accesibilidad a la celulosa. Los análisis por DRX la obtención de material tanto amorfo como cristalino en todas las fibras, excepto en la biomasa. Los resultados por análisis termogravimétrico evidenciaron que la estabilidad térmica de las fibras tratadas químicamente mejoró después de la modificación de la superficie con la ayuda de productos químicos, dichos resultados son más relevantes con el tratamiento alcalino. El estudio permitió evidenciar preliminarmente que las fibras obtenidas por diferentes tratamientos químicos puedan ser objeto de estudios complementarios que las permitan emplearse en la industria papelera como material de refuerzo.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) por la financiación del proyecto de investigación “Aprovechamiento y valorización integral de residuos agrícolas de la industria platanera y bananera: Una alternativa económica y ambientalmente viable, código 130189082312, aprobado en el marco de la Convocatoria

No. 890 de 2020 "Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación de Educación Superior (IES) Públicas 2020".

Bibliografía

- Al Kamzari, S. M. A., Rao, L. N., Lakavat, M., Gandhi, S., Reddy, S., & Sri, G. K. (2021). Extraction and characterization of cellulose from agricultural waste materials. *Mater. Today Proc.*
- Ezeamaku, U. L., Onukwuli, O. D., Ezeh, M. E., Eze, I. O., Odimegwu, N. E., & Agu, C. P. (2022). Experimental investigation on influence of selected chemical treatment on banana fibre. *Industrial Crops and Products*, 185, 115135. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115135>
- Ezeamaku, U., & Eze, M. (2022). Experimental Investigation on influence of selected chemical treatment on banana fibre. *Ind Craps Prod*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115135>
- Ilangoan, M., Guna, V., Prajwal, B., Jiang, Q., & Reddy, N. (2020). Extraction and characterisation of natural cellulose fibers from Kigelia africana. *Carbohydrate polymers*, 236, 115996. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115996>
- Medina Rodríguez, P. A. (2022). Análisis de ciclo de vida de la producción de papel a partir de cáñamo en el contexto colombiano. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/28060>
- Meng, F., Wang, G., Du, X., Wang, Z., Xu, S., & Zhang, Y. (2019). Extraction and characterization of cellulose nanofibers and nanocrystals from liquefied banana pseudo-stem residue. *Composites Part B: Engineering*, 160, 341-347. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.048>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cadena de Banano. (2020).
- Santiago, B., Moreira, M. T., Feijoo, G., & González-García, S. (2022). Environmental comparison of banana waste valorisation strategies under a biorefinery approach. *Waste Management*, 142, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.005>
- Sawarkar, A. N., Kirti, N., Tagade, A., & Tekade, S. P. (2022). Bioethanol from various types of banana waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101092. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101092>
- Shimizu, F. L., Monteiro, P. Q., Ghiraldi, P. H. C., Melati, R. B., Pagnocca, F. C., de Souza, W., ... & Brienzo, M. (2018). Acid, alkali and peroxide pretreatments increase the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem. *Industrial crops and products*, 115, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.024>
- Shrestha, P., Sadiq, M. B., & Anal, A. K. (2021). Development of antibacterial biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from banana pseudostem. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100112>
- Vergara, D. (2022). *Contexto de cadena de banao*. Agrosavia.
- Wu, A., Yin, R., Xu, Z., Zhang, L., You, C., Liu, Y., ... & Tan, B. (2022). Forest gaps slow lignin and cellulose degradation of fir (*Abies faxoniana*) twig litter in an alpine forest. *Geoderma*, 424, 116010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116010>
- Zaini, H. M., Roslan, J., Saallah, S., Munsu, E., Sulaiman, N. S., & Pindi, W. (2022). Banana peels as a bioactive ingredient and its potential application in the food industry. *Journal of Functional Foods*, 92, 105054. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105054>