Obtención y caracterización de nanocelulosa extraída de residuos postcosecha de la caña de azúcar

Autor
Sebastian Danilo Gallo Cordoba

Título por el que opta
Químico

Director
Dra. Julieth Orduña Ortega
Dr. Jorge Andrés Mora Vargas

Grupo de Investigación
GIEMA

Línea de Investigación
Solución a problemas ambientales

Facultad de Ciencias Básicas
Química
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026

Obtención y caracterización de nanocelulosa extraída de residuos postcosecha de la caña de azúcar

Sebastian Danilo Gallo Cordoba

Directora
Dra. Julieth Orduña Ortega

Codirector
Dr. Jorge Andrés Mora Vargas

Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Cali, Colombia
2026

Obtención y caracterización de nanocelulosa extraída de residuos postcosecha de la caña de azúcar

Sebastian Danilo Gallo Cordoba

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Químico.

Directora
Dra. Julieth Orduña Ortega

Codirector
Dr. Jorge Andrés Mora Vargas

Línea de Investigación:
Solución a problemas ambientales
Grupo de Investigación:
GIEMA

Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Química
Cali, Colombia

2026

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Obtención de microfibrillas de celulosa a partir de residuo agroindustrial (hoja de caña de azúcar)	Agricultores, ingenios azucareros y empresas de bioproductos del Valle del Cauca
Responsabilidad social	Aprovechamiento de residuo agrícola que normalmente es quemado o descartado	Comunidades rurales y trabajadores del sector cañero
Científico	Generación de conocimiento sobre extracción y modificación de CMF a partir de hoja de caña de azúcar	Comunidad académica y científica en el área de materiales lignocelulósicos
Indicadores de Gestión	Optimización del protocolo de extracción y caracterización de CMF	Grupo de investigación y futuros estudiantes de pregrado
Tecnológico	Producción de microfibrillas de celulosa modificadas (CMF-Bz) con potencial uso en materiales compuestos	Industrias de plásticos biodegradables, empaques y biomateriales
Técnico	Desarrollo de un método reproducible de hidrólisis ácida y modificación química de celulosa	Laboratorios de investigación y universidades
Ambiental	Valorización de residuo agroindustrial y reducción del impacto ambiental por disposición inadecuada de hojas de caña	Medio ambiente y ecosistemas del Valle del Cauca
Social	Promoción de la economía circular y el uso sostenible de recursos locales	Sociedad en general y sector agroindustrial regional
Cultural	Revalorización del uso de subproductos de la caña de azúcar, patrimonio agroindustrial del Valle del Cauca	Comunidad académica y cultural del suroccidente colombiano

Durante el desarrollo de este trabajo de grado, se participó en los siguientes eventos científicos:

Evento	Tipo de participación	Institución / Lugar
Encuentro Interno De Investigación	Póster	Universidad Santiago de Cali
Iv Congreso Nacional De La Alianza Para El Fortalecimiento De La Investigación Científica, Aplicada Y Tecnológica. (Aficat 2025)	Póster	Universidad Santiago de Cali

Obtención y Caracterización de Nanocelulosa extraída de residuos postcosecha de la caña de azúcar

Sebastián Danilo Gallo Cordoba[1], Julieth Orduña-Ortega[1], Jorge Andrés Mora-Vargas[1]

[1] *Grupo de investigación en electroquímica y medio ambiente, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Santiago de Cali, Cali, Colombia*

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo la obtención, caracterización y modificación química de microfibrillas de celulosa (CMF) a partir de la hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), residuo agroindustrial abundante en el Valle del Cauca. Se aplicó una secuencia de tratamientos, alcalino (NaOH 5%), blanqueamiento (H_2O_2 5%) e hidrólisis ácida usando ácido sulfúrico (H_2SO_4) a diferentes concentraciones (10%, 20%, 40% y 60%), alcanzando porcentajes de extracción entre 34% y 38%, siendo la concentración del 40% la que ofreció el mejor procedimiento de extracción sin carbonización del material. Las CMF obtenidas fueron caracterizadas mediante espectroscopía infrarroja (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) y análisis termogravimétrico (TGA/DTG). Los resultados mostraron una progresiva desfibrilación con el aumento de la concentración de ácido, manteniendo la estructura química característica de la celulosa tipo I. El análisis térmico reveló que la concentración de 20% presentó la mejor estabilidad térmica, mientras que el 40% generó una menor estabilidad atribuible a residuos de ácido por lavado insuficiente. Posteriormente, se realizó la modificación química mediante esterificación con cloruro de benzoilo (CMF-Bz), confirmando la incorporación parcial de grupos benzoato mediante FTIR. Este estudio demuestra el potencial de la hoja de caña de azúcar como materia prima sostenible para la producción de microfibrillas de celulosa y su posterior transformación en materiales poliméricos modificados, contribuyendo a la valorización de residuos agroindustriales y a la economía circular.

Palabras clave: Biomasa lignocelulósica, Residuos agrícolas, Microfibrillas de celulosa, Hoja de caña, hidrólisis ácida, Esterificación.

Obtaining and Characterizing Nanocellulose Extracted from Post-Harvest Sugarcane Waste

ABSTRACT

The objective of this thesis was to obtain, characterize, and chemically modify cellulose microfibrils (CMF) from sugarcane leaves (*Saccharum officinarum*), an agro-industrial waste product that is abundant in the Valle del Cauca region. A sequence of treatments was applied, including alkaline treatment (5% NaOH), bleaching (5% H_2O_2), and acid hydrolysis with H_2SO_4 at different concentrations (10%, 20%, 40%, and 60%), achieving yields between 34% and 38%, with the 40% concentration offering the best yield without carbonization of the material. The resulting CMFs were characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and thermogravimetric analysis (TGA/DTG). The results showed progressive defibrillation with increasing acid concentration, while maintaining the characteristic chemical structure of type I cellulose. Thermal analysis revealed that the 20% concentration exhibited the best thermal stability, whereas the 40% concentration showed lower stability attributable to acid residues resulting from insufficient washing. Subsequently, chemical modification was performed via esterification with benzoyl chloride (CMF-Bz), confirming the partial incorporation of benzoate groups via FTIR. This study demonstrates the potential of sugarcane leaves as a sustainable raw material for the production of cellulose microfibrils and their subsequent transformation into modified polymeric materials, contributing to the valorization of agro-industrial waste and the circular economy.

Keywords: Lignocellulosic biomass, agricultural waste, cellulose microfibrils, sugarcane leaves, acid hydrolysis, esterificati

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de residuos agrícolas, específicamente las hojas de caña de azúcar, representa una oportunidad única para combinar innovación tecnológica con sostenibilidad ambiental. La industria azucarera en Colombia genera aproximadamente 24 millones de toneladas de residuos lignocelulósicos al año, de los cuales una parte significativa corresponde a las hojas de caña. Tradicionalmente, estos desechos se gestionan mediante quema o descomposición, prácticas que no solo contribuyen a la contaminación ambiental, sino que también implican el desaprovechamiento de un recurso potencialmente valioso (Ramírez, 2022).

La valorización de estos residuos mediante la transformación en materiales de alto valor agregado, como lo son las microfibrillas de celulosa, no solo reduce el impacto ambiental, sino que abre nuevas oportunidades económicas y tecnológicas. La celulosa extraída de residuos agrícolas, como la hoja de caña de azúcar, puede ser procesada para obtener microfibrillas de celulosa (MFC). Este material se destaca por sus excelentes propiedades, tales como alta resistencia mecánica, baja densidad, biocompatibilidad y la capacidad de formar películas flexibles, características que lo hacen prometedor para aplicaciones industriales en la fabricación de biocompuestos, embalajes biodegradables, productos farmacéuticos, dispositivos electrónicos y materiales avanzados para la construcción (Trache et al., 2020a).

En este contexto, es relevante resaltar que, a nivel internacional, países como Japón, Suecia, Estados Unidos y Canadá están liderando investigaciones en materiales celulósicos microfibrilados. Por ejemplo, en Japón se han optimizado procesos para producir celulosa microfibrilada de alta pureza, aplicable en dispositivos biomédicos y electrónicos (Randhawa et al., 2022). En Suecia, instituciones como el Instituto Real de Tecnología (KTH) desarrollan nanocompuestos y embalajes biodegradables a base de microfibrillas de celulosa, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del uso de plásticos convencionales (Eichhorn et al., 2022). Por su parte, estudios en Estados Unidos y Canadá han demostrado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos mediante la incorporación de microfibrillas de celulosa (Trache et al., 2020b). La confluencia de estos avances internacionales con la realidad local de Colombia abre una ventana de oportunidades: la aplicación de tecnologías probadas en otros contextos para transformar los residuos lignocelulósicos en materiales celulósicos de alto valor puede no solo optimizar la gestión de desechos, sino también impulsar el desarrollo industrial y la innovación en la región. Este intercambio de conocimiento evidencia la importancia de adaptar y transferir tecnologías sostenibles, posicionando al país en la vanguardia de la transformación hacia una economía circular y de bajo impacto ambiental.

La celulosa, es el principal componente estructural que se encuentra en las paredes celulares de las plantas, es un biopolímero compuesto por largas cadenas de moléculas de glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos β (1→4) que le dan su estructura lineal y altamente resistente, que permiten la formación de fibras rígidas y su función estructural en las plantas. Estas cadenas se agrupan formando microfibrillas que proporcionan resistencia y estabilidad a las paredes celulares. La organización estructural de estas microfibrillas se divide en dos tipos principales: regiones cristalinas, altamente ordenadas, y regiones amorfas, menos estructuradas y más flexibles (Villegas-González et al., 2023). La estructura química general de la celulosa se presenta en la Figura 1. En las plantas, las microfibrillas de celulosa están rodeadas por otros componentes como hemicelulosas, lignina y proteínas, creando una matriz lignocelulósica compleja (Vegas Niño et al., 2024). Esta matriz no solo proporciona rigidez y soporte, sino que también permite a las células vegetales resistir tensiones externas y mantener su integridad estructural (Hernández Pérez et al., 2023). En la Figura 2 se muestra la estructura química de la hemicelulosa.

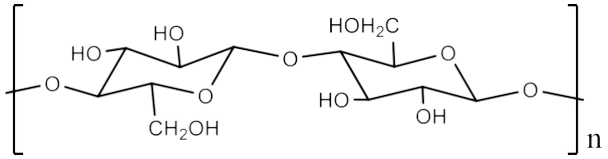


Figura 1. Estructura química de la celulosa.

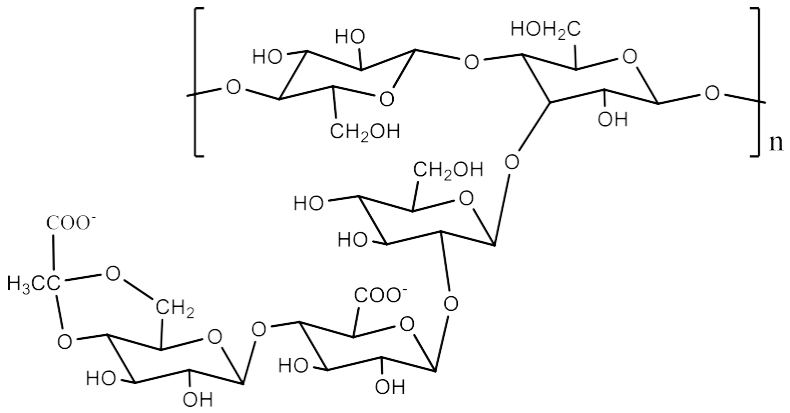


Figura 2. Estructura Química de la hemicelulosa

La celulosa en las plantas se organiza en las paredes celulares, las cuales se dividen en dos capas principales. Estas son: la pared primaria, compuesta por microfibrillas de celulosa menos ordenadas, y la pared secundaria, también formada por microfibrillas de celulosa, pero con una disposición mucho más organizada (Chebli et al., 2021). Esta disposición da lugar a regiones altamente cristalinas que proporcionan mayor resistencia estructural. Además, en estas regiones cristalinas de la pared secundaria, se encuentra una mayor concentración de lignina, un compuesto que contribuye significativamente a la rigidez y durabilidad de la pared celular (Chebli et al., 2021). La organización estructural de las microfibrillas de celulosa no solo da lugar a regiones cristalinas y amorfas, sino que también permite la formación de diferentes tipos cristalinos, conocidos como celulosa I, II, III y IV. Estas variantes cristalinas presentan propiedades únicas que las hacen adecuadas para diversas aplicaciones industriales y científicas (Eichhorn et al., 2022). Con el paso del tiempo se han ido utilizando varias terminologías para los diferentes tipos de materiales celulósicos. En el año del 2011, la Asociación Técnica de la Pulpa y de la Industria del Papel (TAPPI) estableció términos estandarizados para los nanomateriales y microfibrillas de celulosa. En la Figura 3 se observa la clasificación dada por el TAPPI (Hernández Pérez et al., 2023).

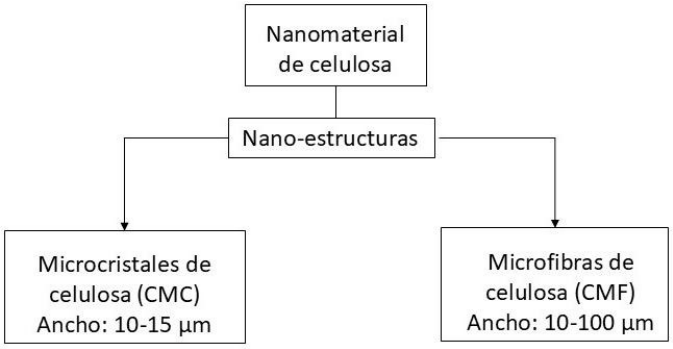


Figura 3. Clasificación de los materiales celulósicos (Fornari et al., 2022).

La celulosa tipo I es la forma nativa que se encuentra en la naturaleza. Se caracteriza por su estructura altamente ordenada y está presente en las paredes celulares de plantas, bacterias y algas. Dentro de este tipo de celulosa se distinguen dos subformas: Iα, predominante en bacterias y algas, y Iβ, predominante en las plantas. Estas diferencias estructurales influyen en las propiedades físicas y químicas de la celulosa tipo I (Chebli et al., 2021). La celulosa tipo II se obtiene mediante tratamientos químicos que reorganizan la estructura cristalina de la celulosa tipo I. Uno de los métodos más comunes es el tratamiento con hidróxido de sodio acuoso, que produce una forma más estable termodinámicamente. Este tipo de celulosa es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, especialmente en la fabricación de fibras textiles y materiales compuestos (Hernández Pérez et al., 2023). La

celulosa tipo III se forma al tratar la celulosa tipo I o tipo II con amoníaco líquido o gas, seguido de un lavado con alcohol para completar la modificación estructural. Este tipo de celulosa se caracteriza por una recristalización parcial y fragmentación de los cristales, lo que le confiere propiedades únicas para aplicaciones especializadas (Kim et al., 2026). La celulosa tipo IV se obtiene sometiendo la celulosa tipo III a un proceso de calentamiento controlado en un medio de glicerol. Es el tipo menos común y estudiado de las formas cristalinas, con propiedades intermedias entre los otros tipos de celulosa (Hernández Pérez et al., 2023).

1.1 Métodos de Caracterización de la celulosa

Debido a las dimensiones nanométricas y a la complejidad estructural de la nanocelulosa, es indispensable emplear técnicas analíticas avanzadas para determinar sus propiedades morfológicas, estructurales, químicas, térmicas y de estabilidad. Cada método proporciona datos complementarios que, en conjunto, permiten optimizar los procesos de extracción y adecuar el material a aplicaciones específicas. Entre los principales métodos destacan:

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Permite visualizar la morfología facilitando el análisis de la superficie y la distribución dimensional (diámetro y longitud) de las nanofibras (Lopes et al., 2021).

- Difracción de Rayos X (XRD): Es crucial para poder determinar la estructura cristalina de la nanocelulosa. Mediante esta técnica se obtiene el grado de cristalinidad, lo que permite evaluar como el procesamiento afecta la disposición ordenada de las cadenas de celulosa (Eichhorn et al., 2022).

- Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR): Utilizado para identificar y confirmar la presencia de grupos funcionales característicos de la celulosa, tales como las vibraciones del grupo hidroxilo. Haciendo uso de este análisis se puede utilizar para evaluar si existen cambios en la estructura de a nanocelulosa durante el proceso de extracción o purificación (Dassanayake et al., 2023).

- Termogravimetría (TGA): Método que analiza la pérdida de masa en función de la temperatura y ayuda a evaluar la composición y los perfiles de descomposición de los materiales.

La integración de estos métodos de caracterización es fundamental para validar la calidad y funcionalidad de la nanocelulosa, permitiendo ajustar y optimizar las condiciones del proceso de extracción y purificación. Asimismo, este análisis exhaustivo respalda la adaptación de la nanocelulosa a aplicaciones específicas, ya sea en biocompuestos, embalajes biodegradables o materiales electrónicos.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una metodología experimental adaptada y optimizada progresivamente a partir de protocolos reportados en la literatura. La obtención de las microfibrillas de celulosa se basó en el procedimiento descrito por Presenda-Gerónimo et al., 2020 con modificaciones importantes adaptadas al residuo de hoja de caña de azúcar. La materia prima utilizada consistió en hoja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) previamente recolectada, secada y pulverizada.

El proceso inició con un tratamiento alcalino empleando una solución de NaOH al 5% en una relación sólido-líquido de 1:25 (g/mL), manteniendo la mezcla a 80 °C durante 2 horas bajo agitación constante. Posteriormente, el sólido se separó por filtración al vacío y se lavó con agua destilada hasta alcanzar pH neutro. El material obtenido se sometió entonces a un proceso de blanqueamiento con una solución de H_2O_2 al 5% (relación 1:25) a 75-80 °C durante 2 horas, seguido de nueva filtración y lavado. La etapa final consistió en la hidrólisis ácida utilizando soluciones de H_2SO_4 a diferentes concentraciones (10 %, 20 %, 40 % y 60 %) a 45 °C durante 1 hora. La reacción se detuvo agregando 100 mL de agua destilada fría, y la suspensión se sometió a múltiples ciclos de centrifugación (aproximadamente siete) hasta alcanzar pH neutro. Finalmente, el sólido recuperado se secó a temperatura ambiente para su posterior caracterización, obteniéndose las microfibrillas de celulosa. El proceso completo de extracción se ilustra en la Figura 4.

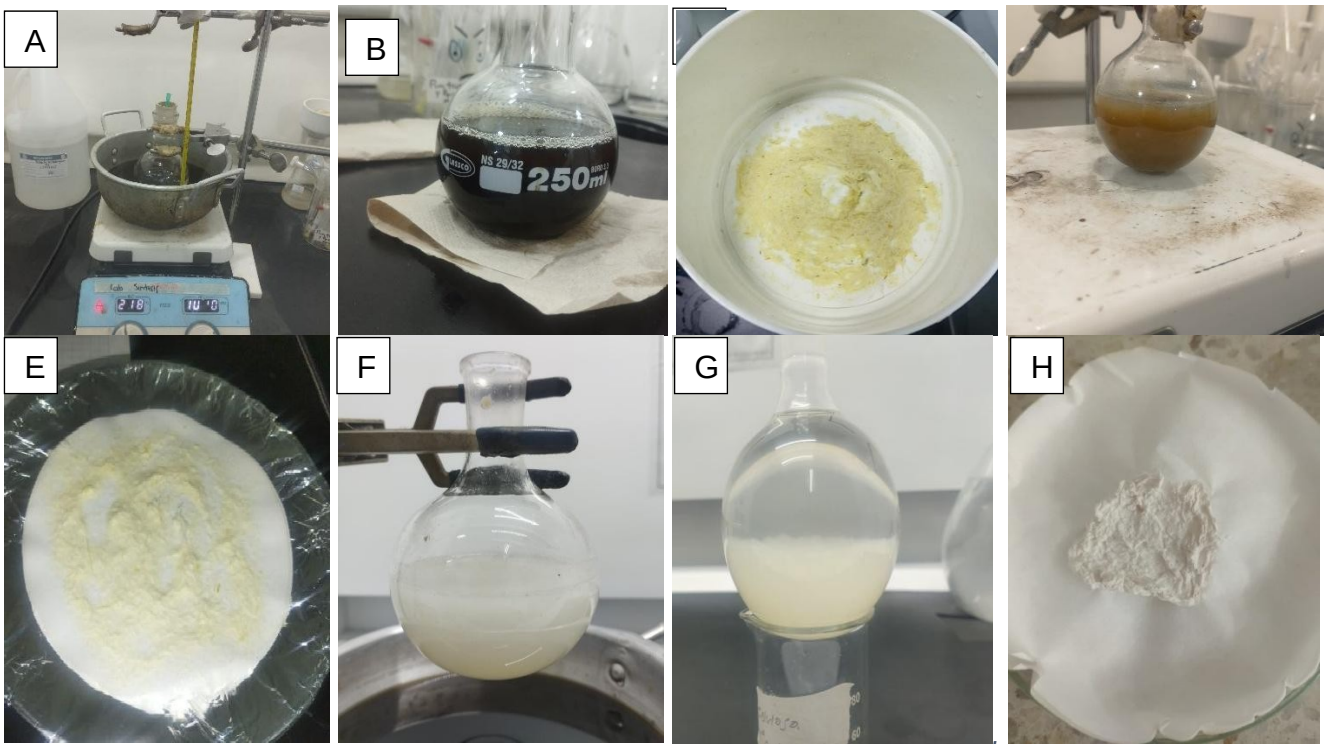


Figura 4. Proceso de extracción de la celulosa. (A): Montaje, (B): Rxn NaOH, (C): Producto filtrado de la reacción alcalina, (D): Blanqueo con H_2O_2, (E): Secado H_2O_2, (F): Rxn H_2SO_4, (G): Rxn detenida con agua destilada fría., (H): Producto Obtenido

2.1 MODIFICACIÓN QUÍMICA DE LAS MICROFIBRILLAS DE CELULOSA

Una vez obtenidas las microfibrillas de celulosa, se procedió a su modificación mediante esterificación con cloruro de benzoilo. Esta etapa se realizó adaptando el procedimiento descrito por Daiqiang et al., 2010, para la acilación de celulosa con cloruros de ácidos en sistema homogéneo. Se dispersaron 1 g de celulosa en 30 mL de dimetilsulfóxido (DMSO). Posteriormente, se añadieron 3 mL de piridina y 2,15 mL de cloruro de benzoilo. Inicialmente la mezcla se agitó durante 1 hora a temperatura ambiente, pasado el tiempo se aumentó la temperatura a 60 °C y se mantuvo bajo agitación constante durante 1 hora adicional, momento en el cual se obtuvo una mezcla homogénea. Después de enfriar la mezcla a temperatura ambiente, se precipitó el producto adicionando lentamente 100 mL de agua destilada. El sólido se filtró y se lavó con metanol. Posteriormente se realizó una nueva dispersión en agua destilada bajo agitación para completar la purificación. Finalmente, el material se filtró y se secó en horno a 40 °C

3. RESULTADOS

Durante la etapa de pretratamiento alcalino, al adicionar solución de NaOH a las hojas de caña previamente trituradas, se observó rápidamente la formación de un licor negro intenso, indicando la solubilización de lignina y otros componentes no celulósicos(Valdivieso, 2020; Zambrano Zambrano et al., 2021). Este comportamiento fue consistente en todas las pruebas realizadas. Posteriormente, en la etapa de blanqueamiento, se presentaron dificultades iniciales. Utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3% durante 3 horas a 70 °C, el material obtenido no presentaba el grado de blancura deseado, permaneciendo con un tono amarillento. Tras realizar una prueba aumentando la concentración a 5% de H_2O_2 manteniendo las mismas condiciones de tiempo y temperatura, se logró un blanqueamiento significativamente más efectivo, obteniendo un material de color más claro. La etapa más crítica del proceso de obtención fue la hidrólisis ácida. Siguiendo reportes de la literatura que recomendaban una concentración de ácido sulfúrico del 60%(Hernández Pérez et al., 2023; Seddiqi et al., 2021), se observó carbonización del material en todos los intentos. Debido a esto, se realizaron pruebas variando la concentración

del ácido entre 10%, 20% y 40%. De estas pruebas, las concentraciones más bajas permitieron evitar la carbonización, aunque influyeron en el rendimiento y en las características de la microfibrilla obtenida.

3.1 Rendimiento de obtención de microfibrilla de celulosa

Los porcentajes de extracción de microfibrillas de celulosa obtenidos a partir de hojas de caña de azúcar se encontraron dentro del rango esperado según el contenido de celulosa reportado en la literatura (33–44 %) por Hernández Pérez et al. (2023b). El rendimiento de extracción se determinó mediante la ecuación: Extracción de celulosa (%) = (Masa de celulosa extraída / Masa inicial del material) × 100 (Karn et al., 2022). Los resultados mostraron que el tratamiento con H_2SO_4 al 10 % alcanzó un rendimiento del 34 %, mientras que al 20 % se obtuvo un 36 %, valor que coincide con los reportados previamente. La mayor eficiencia se obtuvo con una concentración del 40 %, alcanzando un rendimiento del 38 %, por lo que esta condición fue seleccionada como óptima para la obtención del material destinado a la caracterización y a la posterior modificación química. Por el contrario, el tratamiento con H_2SO_4 al 60 % provocó la carbonización completa del material, lo que impidió la recuperación de celulosa.

3.2 Caracterización por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

En la Figura 5 se presentan los espectros de infrarrojo obtenidos para la celulosa extraída; en ellos se muestran claramente características de la celulosa tipo I (Etale et al., 2023). La banda más prominente es la banda entre los 3200 y 3500 cm^{-1}, centrada alrededor de los 3416 y 3433 cm^{-1}, que corresponden al estiramiento de los grupos hidroxilo (-OH) (Kostryukov et al., 2023). De la misma manera, se identifica una banda alrededor de 2890 a 2900 cm^{-1}, siendo esta atribuida al estiramiento (C-H) de los grupos metileno presentes en la cadena celulósica. En las regiones de 1600 a 1700 cm^{-1}, aparece una banda de intensidad media que se encuentra asociada a las vibraciones de flexión del agua adsorbida en el material (Kostryukov et al., 2023). Desde 1300 hasta 1450 cm^{-1} se pueden observar varias bandas que se pueden relacionar con las vibraciones de deformación de los grupos (CH_2) y (CH). Finalmente, en la región de huella dactilar 1000-1200 cm^{-1}, se presentan las bandas más intensas y características de la celulosa, ubicadas entre 1165 y 1110 cm-1, que pertenecen a las vibraciones del enlace (C-O-C) del anillo piranósico, y entre 1058 y 1040 cm^{-1}, que pertenecen al estiramiento de (C-O). Al comparar los espectros de las tres concentraciones se evidencia una gran similitud entre ellos, indicando que la variación en la concentración de ácido sulfúrico no produjo modificaciones químicas importantes en la estructura principal de la celulosa. No se observan la aparición de nuevas bandas ni la desaparición de las características de la celulosa. Sin embargo, se aprecian ligeras diferencias en la intensidad y definición de algunas señales, como lo son las señales de la región del 1000 – 1200 cm^{-1}, siendo ligeramente más definidas en la muestra preparada con 40% de H_2SO_4. Esto podría relacionarse por un mayor grado de hidrólisis y mejor separación de microfibrillas en esta condición.

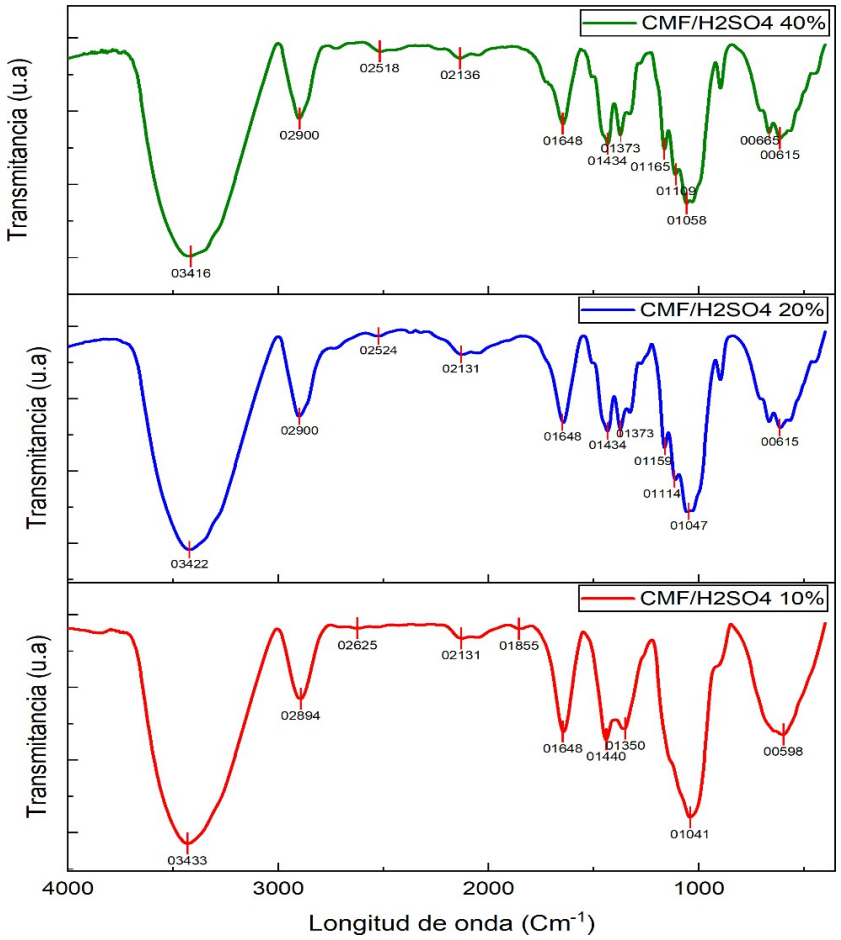


Figura 5. Espectros FTIR de microfibrilla de celulosa obtenida a diferentes concentraciones de ácido sulfúrico.

En el espectro de la Figura 6 se observan cambios coherentes con una benzoilación superficial; siendo la banda ancha de (O-H) alrededor de 3493 cm^{-1} aparece un poco más atenuada y más estrecha, lo que indica un consumo parcial de hidroxilos, simultáneamente se evidencia una banda en 2894 cm^{-1}, que corresponde al estiramiento (C-H) de los grupos alifáticos característicos de la estructura polisacarída de la celulosa. La señal más importante presentada es la que se encuentra en la banda de 1733 cm^{-1}, aunque es pequeña esta banda corresponde al estiramiento del grupo carbonilo (C=O) de un éster aromático (Kostryukov et al., 2023). La banda en 1648 cm^{-1} se encuentra asociada las vibraciones de flexión del agua absorbida, La señal en la banda de 1429 cm^{-1} se encuentra asociada con las vibraciones (C-C) del anillo aromático, también relacionado con las deformaciones (CH_2) de la celulosa, y las deformaciones de los grupos (C-H) evidenciados por la banda en 1373 cm^{-1}. Finalmente, en la región de huella dactilar 1200 a 900 cm^{-1} se evidencia la preservación de la identidad de la celulosa al haber señales en 1109 y 1058 cm^{-1} que es donde se encuentran el estiramiento (C-O) característico de la estructura celulósica, indicando de esta manera que la estructura básica del polisacárido se conservó después de la modificación química. En comparación con Figura 4, la aparición de la banda carbonilo y el aumento de señales aromáticas confirman la formación de grupos benzoato, aunque la baja intensidad de la banda carbonilo sugiere que la modificación pudo haberse producido en una extensión limitada.

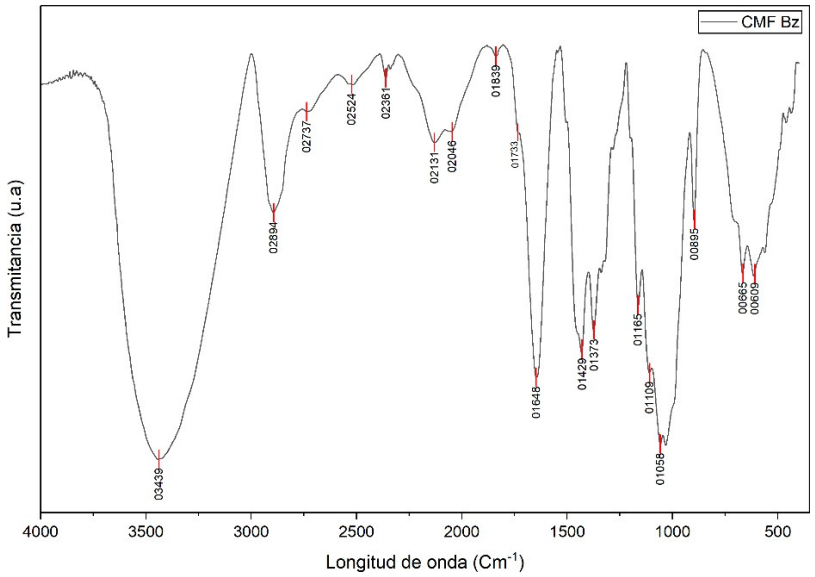


Figura 6. Espectroscopía Infrarroja (FTIR) de la microfibrilla de celulosa modificada con cloruro de benzoilo (CMF Bz)

3.3 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Con el fin de evaluar la estabilidad térmica de las microfibrillas de celulosa obtenidas mediante hidrólisis ácida y de la muestra modificada con cloruro de benzoilo, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) complementado con su correspondiente curva derivada (DTG). La Figura 7 muestra las curvas TGA de todas las muestras estudiadas, permitiendo comparar las etapas de degradación térmica y los cambios en la estabilidad térmica ocasionados por los diferentes tratamientos. Todas las muestras presentan un comportamiento térmico característico de materiales lignocelulósicos, con dos etapas principales de pérdida de masa; la primera etapa que está entre los 50°C-150°C, corresponde a la pérdida de humedad y agua adsorbida (Melesse et al., 2022). En esta etapa se observa una pérdida de masa relativamente baja, siendo de un valor entre 4% y 8% en todas las muestras. La modificada con cloruro de benzoilo (CMF Bz) muestra una menor pérdida de humedad, lo que es consistente con una reducción de la hidrofilicidad tras la incorporación de grupos benzoilo. La segunda etapa que es la etapa principal de degradación ocurre entre los 220 °C y 380 °C aproximadamente y corresponde a la descomposición térmica de la celulosa. Al comparar las microfibrillas sin modificar se observa que las muestras obtenidas presentan una estabilidad térmica similar, con la degradación principal iniciando alrededor de los 300°C. Sin embargo, la muestra preparada con 40% de H_2SO_4 muestra un inicio de degradación a menor temperatura y una curva con mayor pendiente. Este comportamiento puede estar asociado no solo a un mayor grado de hidrólisis, sino también a un lavado insuficiente después de la hidrólisis ácida. Este residuo ácido pudo catalizar la degradación térmica prematura del material. Por otro lado, la microfibrilla de celulosa modificada con cloruro de benzoilo (CMF Bz) presenta un perfil térmico distinto su degradación inicia a menor temperatura que las muestras sin modificar y muestra una pérdida de masa más gradual entre 200 y 320°C aproximadamente. Este desplazamiento hacia menores temperaturas es característico de celulosas esterificadas (Zhao et al., 2021), donde la incorporación de grupos benzoilo reduce la estabilidad térmica inicial (Ajayi et al., 2023).

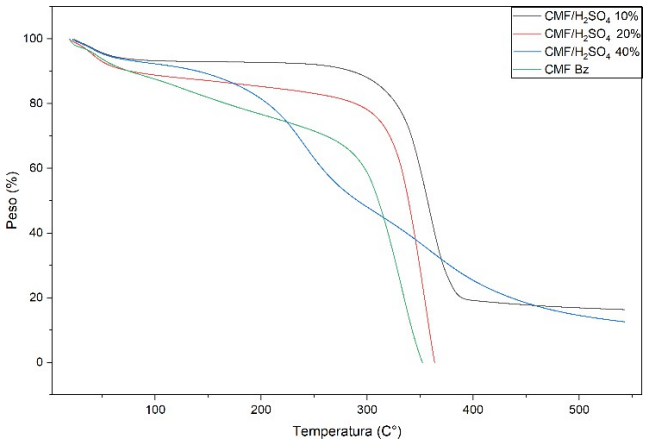


Figura 7. Curvas TGA de las microfibrillas de celulosa obtenidas con 10%, 20% y 40% de H_2SO_4 y de la microfibrilla de celulosa modificada con cloruro de benzoilo (CMF Bz).

La Figura 8 presenta las curvas derivadas de termogravimetría de las microfibrillas de celulosa (CMF) sometidas a diferentes tratamientos de hidrólisis ácida con ácido sulfúrico y comparadas con la muestra CMF Bz. En un inicio todas las muestras exhiben una primera pérdida de masa a bajas temperaturas, aproximadamente entre 30 y 70 °C, la cual puede atribuirse a la eliminación de humedad adsorbida físicamente y de compuestos volátiles retenidos en la estructura fibrosa. A medida que aumenta la temperatura, se observan diferencias significativas en el comportamiento térmico de las muestras en función de la concentración de ácido sulfúrico empleada durante el tratamiento. La muestra tratada con H_2SO_4 al 40% presenta un evento de degradación amplio centrado alrededor de 240–250 °C, el cual no se observa con la misma intensidad en las demás muestras. La aparición de este pico a temperaturas relativamente bajas indica la presencia de estructuras con menor estabilidad térmica, posiblemente asociadas a una mayor hidrólisis de las cadenas celulósicas y a una reducción del grado de polimerización ocasionada por el tratamiento ácido más severo. Este comportamiento sugiere que el incremento de la concentración de ácido promueve modificaciones estructurales importantes en las fibras, generando regiones más susceptibles a la degradación térmica temprana. Asimismo, la amplitud de este evento indica que la degradación ocurre sobre una distribución amplia de estructuras químicas con diferentes niveles de estabilidad (Malyar et al., 2023a). La región principal de degradación se encuentra entre aproximadamente 300 y 380 °C y corresponde principalmente a la descomposición de la celulosa. Durante esta etapa tienen lugar procesos de deshidratación intramolecular, ruptura de enlaces glucosídicos y formación de productos volátiles derivados de la pirólisis de la estructura celulósica. En esta zona se observan diferencias importantes entre las muestras analizadas. La muestra CMF Bz presenta un máximo de degradación alrededor de 330–340 °C, indicando que la velocidad máxima de pérdida de masa ocurre a temperaturas relativamente menores en comparación con las muestras tratadas con ácido sulfúrico al 10% y al 20%. Este comportamiento podría asociarse a la presencia de una mayor proporción de regiones amorfas, las cuales suelen degradarse más fácilmente debido a su menor orden estructural.

La muestra tratada con H_2SO_4 al 20% presenta el pico de mayor intensidad entre todas las muestras evaluadas. Aunque la temperatura correspondiente al máximo de degradación es ligeramente inferior a la observada para la muestra tratada al 10%, la elevada intensidad del pico indica que la pérdida de masa ocurre de forma más rápida y concentrada dentro de un intervalo de temperatura relativamente estrecho. Este comportamiento puede interpretarse como una mayor homogeneidad estructural del material, donde una proporción importante de las cadenas celulósicas presenta características similares de estabilidad térmica y, por lo tanto, se degrada de manera simultánea. La muestra tratada con H_2SO_4 al 40% presentó un comportamiento térmico diferente al observado para las demás muestras, evidenciado por la aparición de un evento de degradación adicional alrededor de 240–250 °C y por una distribución más amplia de la degradación principal. Este comportamiento puede atribuirse a una mayor alteración de la estructura celulósica ocasionada por el tratamiento ácido más severo. Sin embargo, debe considerarse que durante la preparación de esta muestra se presentó una limitación en la etapa de lavado, lo que pudo favorecer la permanencia de residuos de ácido sulfúrico en el material. La presencia de estos residuos puede

catalizar reacciones de deshidratación y degradación térmica, promoviendo la pérdida de masa a temperaturas inferiores y contribuyendo al desplazamiento de los eventos de degradación observados en la curva DTG. Por tanto, la menor estabilidad térmica observada para esta muestra podría estar asociada tanto a modificaciones estructurales inducidas por el tratamiento ácido como a la presencia residual de ácido sulfúrico en la superficie de las fibras(Malyar et al., 2023b).

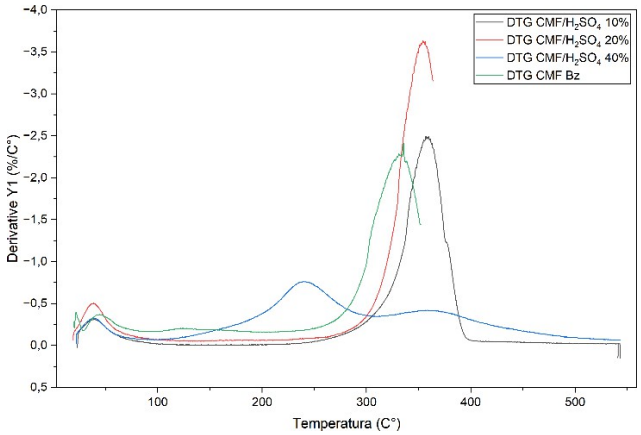


Figura 8. Curva DTG de las microfibrillas de celulosa (CMF) sometidas a diferentes tratamientos de hidrólisis ácida con ácido sulfúrico (H_2SO_4) a concentraciones del 10%, 20% y 40%, y de la microfibrilla de celulosa modificada con cloruro de benzoilo (CMF Bz).

3.4 Espectroscopía de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS)

El análisis mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) de las microfibrillas de celulosa (CMF) tratadas con ácido sulfúrico a diferentes concentraciones permitió identificar la composición elemental principal de las muestras. En la muestra tratada con H_2SO_4 al 10% (Figura 9A), el espectro muestra predominantemente carbono (C) y oxígeno (O), con porcentajes en peso aproximados de 40,0% y 43,9% respectivamente, valores consistentes con la estructura química de la celulosa. De igual manera, en la muestra tratada con H_2SO_4 al 20% (Figura 9B) se registraron contenidos de 41,5% de carbono y 43,2% de oxígeno, manteniendo una composición elemental muy similar. En contraste, en la muestra tratada con H_2SO_4 al 40% (Figura 9C), además de los elementos principales carbono (40,3%) y oxígeno (44,4%), se detecta la presencia de azufre (S) en una proporción aproximada del 6,1% en peso. Esta presencia de azufre se atribuye a residuos del proceso de hidrólisis con ácido sulfúrico que no fueron completamente eliminados durante el lavado de la muestra. Los mapas de distribución elemental en las tres muestras muestran una dispersión homogénea de carbono y oxígeno a lo largo de la superficie de las microfibrillas, confirmando la preservación de la estructura base celulósica tras los tratamientos ácidos. En general, los resultados de EDS indican que las CMF mantienen su composición elemental característica (principalmente C y O) en las concentraciones de 10% y 20%. La detección de azufre residual únicamente en la muestra tratada con la concentración más alta (40%) resalta la necesidad de optimizar los procesos de lavado posteriores a la hidrólisis, especialmente cuando se utilizan concentraciones elevadas de ácido, con el fin de garantizar una mayor pureza del material obtenido. La homogeneidad observada en los mapas elementales sugiere que los tratamientos realizados fueron efectivos en términos de modificación morfológica sin comprometer drásticamente la pureza química de las CMF en las concentraciones más bajas. Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de cómo las condiciones de procesamiento afectan la calidad del material obtenido y resaltan la necesidad de ajustar los protocolos experimentales para minimizar residuos y maximizar la pureza de las microfibrillas destinadas a aplicaciones en materiales compuestos, biomateriales o nanotecnología.

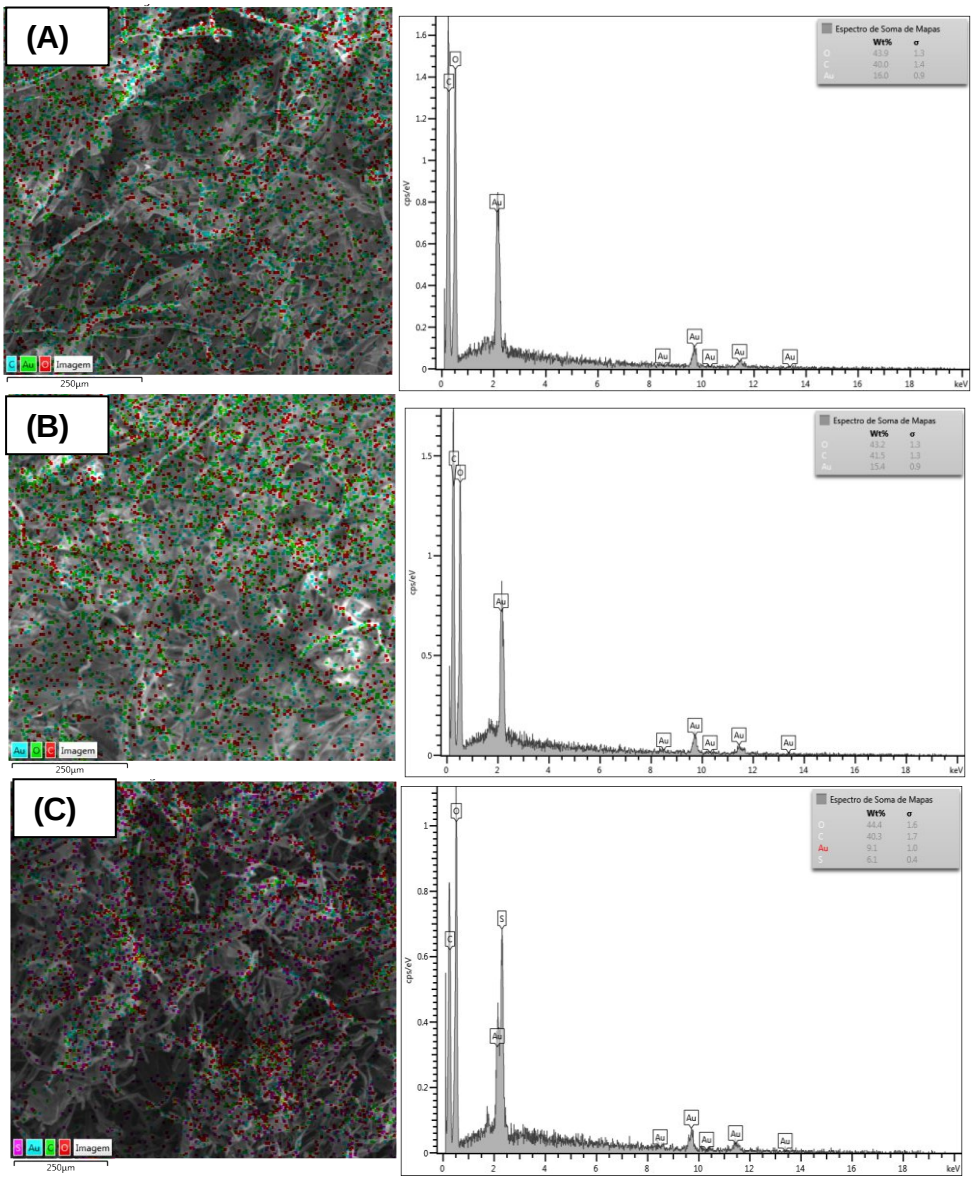


Figura 9. Espectros EDS de las microfibrillas de celulosa obtenidas con diferentes concentraciones de H_2SO_4: (A) 10 %, (B) 20 % y (C) 40 %.

3.4 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Los análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron observar los cambios morfológicos superficiales en las microfibrillas de celulosa (CMF) después del tratamiento de hidrólisis con ácido sulfúrico a diferentes concentraciones. En las imágenes correspondientes a la muestra tratada con H_2SO_4 al 10% (Figuras 10A y 10B), se observa una morfología caracterizada por fibras relativamente gruesas y en forma de cintas o láminas anchas, con diámetros que varían entre aproximadamente 10 y 50 µm. La superficie presenta una estructura irregular, con pliegues, dobleces y cierto grado de aglomeración entre las fibras. En la Figura 10A (mayor aumento) se aprecian claramente las superficies rugosas y las uniones entre fibras individuales, mientras que en la Figura 10B (menor aumento) se evidencia una red entrelazada pero aún con presencia de estructuras más grandes y menos desfibriladas. Este aspecto sugiere que, a una concentración baja de ácido, la hidrólisis es moderada, eliminando parcialmente componentes amorfos sin lograr una separación completa de las microfibrillas.

En las Figuras 10C y 10D, correspondientes al tratamiento con H_2SO_4 al 20%, se evidencia un cambio morfológico significativo. Las microfibrillas aparecen más separadas y desfibriladas en comparación con la concentración anterior. Se observan fibras más delgadas y alargadas, con una mayor proporción de estructuras fibrilares individuales o en pequeños haces. La Figura 10D (mayor aumento) muestra claramente superficies más lisas en algunas zonas y un mayor grado de separación entre las fibras. Esta concentración parece representar un punto óptimo donde se obtiene una mayor individualización de las microfibrillas sin causar una degradación excesiva de la estructura. Por último, en las Figuras 10E y 10F (tratamiento con H_2SO_4 al 40%), se observa la morfología más alterada de la serie. Las microfibrillas presentan un aspecto más fragmentado y con mayor presencia de estructuras cortas y delgadas. Aunque aún se mantienen fibras alargadas, se nota un aumento en la rugosidad superficial y en algunos casos una apariencia más dañada o erosionada, particularmente visible en la Figura 10F. Este comportamiento es consistente con una hidrólisis más agresiva, donde la alta concentración de ácido no solo separa las fibrillas, sino que también puede causar una degradación parcial de las cadenas celulósicas, resultando en fibras más cortas y con mayor superficie expuesta. Primordialmente, los micrógrafos SEM revelan una tendencia clara: a medida que aumenta la concentración de ácido sulfúrico (del 10% al 40%), se produce una progresiva desfibrilación y reducción en el diámetro de las microfibrillas, acompañada de una mayor separación entre ellas. Sin embargo, concentraciones elevadas (40%) parecen inducir cierto grado de daño estructural. Estos cambios morfológicos explican en parte los resultados obtenidos en los análisis termogravimétricos (DTG), donde la muestra al 40% mostró menor estabilidad térmica, posiblemente debido a una mayor superficie expuesta y menor grado de polimerización. Asimismo, la homogeneidad observada en los mapas elementales de EDS se correlaciona con la distribución uniforme de las fibras vista en SEM.

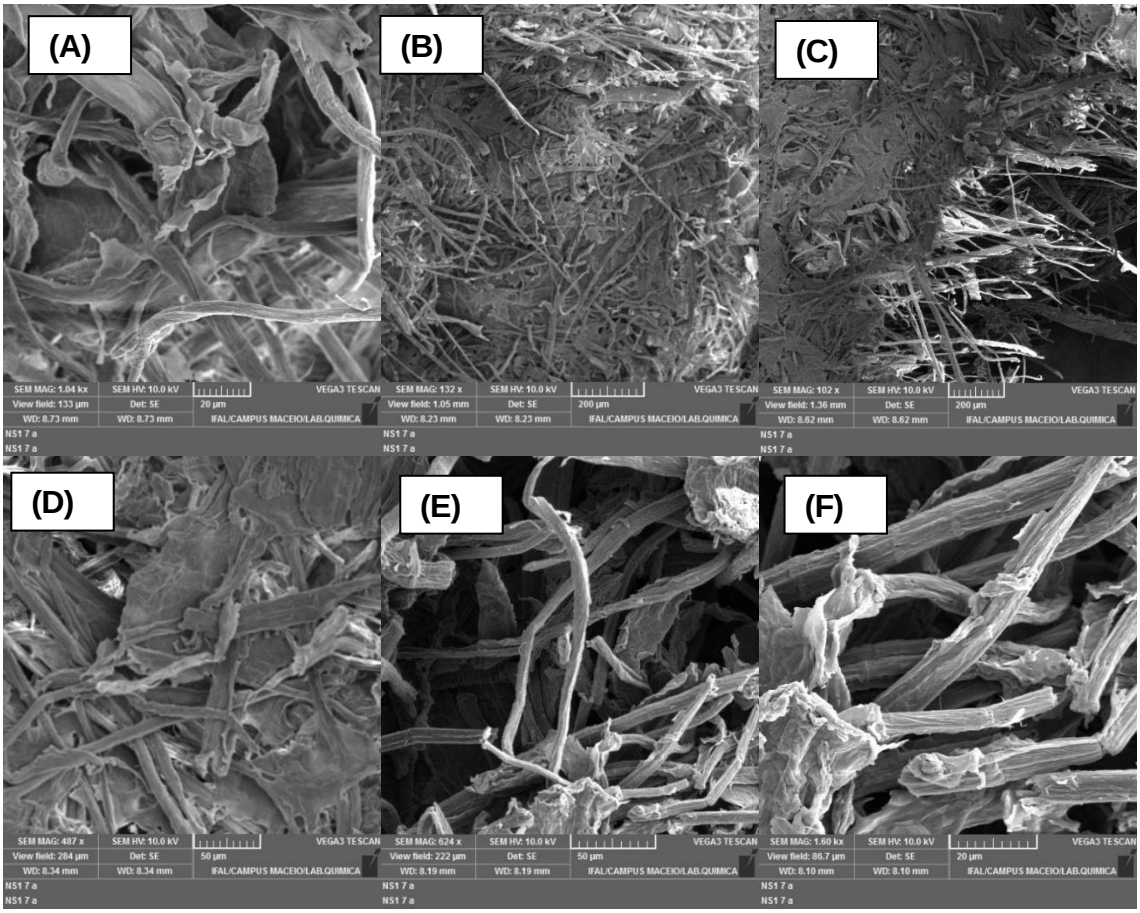


Figura 10. Micrografías SEM de las microfibrillas de celulosa obtenidas a diferentes concentraciones de H_2SO_4 siendo A, B: 10%, C, D: 20% y E, F: 40%

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo de grado permitió obtener y caracterizar microfibrillas de celulosa a partir de hoja de caña de azúcar mediante un proceso químico adaptado, así como evaluar el efecto de la concentración de ácido sulfúrico en las propiedades del material y realizar su modificación superficial mediante esterificación con cloruro de benzoilo. Se logró optimizar las condiciones de hidrólisis ácida, determinando que concentraciones moderadas (20-40%) evitan la carbonización del material y permiten obtener rendimientos entre 36% y 38%, valores acordes con el contenido de celulosa reportado para este residuo. Los análisis SEM evidenciaron una clara tendencia a la desfibrilación e individualización de las microfibrillas con el aumento de la concentración de ácido, siendo la condición del 20% la que ofreció un buen balance entre separación de fibras y preservación de la estructura. Los resultados de FTIR confirmaron la preservación de la estructura principal de la celulosa tipo I en todas las muestras, mientras que el análisis EDS reveló la composición elemental característica (C y O) con presencia de azufre residual únicamente en la muestra tratada al 40%, destacando la importancia de optimizar los procesos de lavado posterior a la hidrólisis. Por su parte, los análisis TGA/DTG demostraron que la estabilidad térmica es sensible a la concentración de ácido utilizada, siendo la del 20% la que presentó el mejor comportamiento térmico, mientras que la del 40% mostró degradación a menor temperatura debido principalmente a residuos ácidos. La modificación química con cloruro de benzoilo permitió obtener CMF-Bz, confirmando la incorporación de grupos benzoato a través de la aparición de la banda carbonílico en FTIR, lo que representa un avance hacia la obtención de materiales más compatibles con matrices poliméricas hidrofóbicas. En general, este estudio demuestra que la hoja de caña de azúcar es una materia prima viable y sostenible para la producción de microfibrillas de celulosa. Los resultados resaltan la necesidad de un riguroso control en las etapas de lavado y neutralización para obtener materiales de alta pureza y estabilidad térmica. Este trabajo contribuye a la valorización de residuos agroindustriales en el Valle del Cauca y abre la puerta a futuras investigaciones orientadas a la aplicación de estas CMF y CMF-Bz en empaques biodegradables y otros biomateriales.

5. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi directora, Dra. Julieth Orduña Ortega, y a mi codirector, Dr. Jorge Andrés Mora Vargas, por su constante orientación, apoyo académico y valiosos aportes durante todo el desarrollo de este trabajo de grado. Su dedicación, paciencia y conocimientos fueron fundamentales para la culminación de este proyecto. Asimismo, agradezco a los estudiantes del Programa Delfín que colaboraron en la etapa de optimización de la hidrólisis ácida; su ayuda fue esencial en los ensayos exploratorios. A mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de toda mi carrera universitaria. Este logro también es de ustedes. Finalmente, agradezco a la Universidad Santiago de Cali, a la Facultad de Ciencias Básicas y al Grupo de Investigación GIEMA por brindar las instalaciones y recursos necesarios para la realización de este trabajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ajayi, S. M., Olusanya, S. O., Sodeinde, K. O., Didunyemi, A. E., Atunde, M. O., Fapojuwo, D. P., Olumayede, E. G., & Lawal, O. S. (2023). Hydrophobic modification of cellulose from oil palm empty fruit bunch: Characterization and application in Pickering emulsions stabilization. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *5*, 100282. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100282

Chebli, Y., Bidhendi, A. J., Kapoor, K., & Geitmann, A. (2021). Cytoskeletal regulation of primary plant cell wall assembly. *Current Biology*, *31*(10), R681–R695. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.03.092

Daiqiang, X., Bin, L., Courtney, T., & Kevin, E. (2010, diciembre 7). *Studies on regioselective acylation of cellulose with bulky acid chlorides | Cellulose*. DeepDyve. https://www.deepdyve.com/lp/springer-journals/studies-on-regioselective-acylation-of-cellulose-with-bulky-acid-oJgQRiJvzu

Dassanayake, R. S., Dissanayake, N., Fierro, J. S., Abidi, N., Quitevis, E. L., Boggavarappu, K., & Thalangamaarachchige, V. D. (2023). Characterization of cellulose nanocrystals by current spectroscopic techniques. *Applied Spectroscopy Reviews*, *58*(3), 180–205. https://doi.org/10.1080/05704928.2021.1951283

Eichhorn, S. J., Etale, A., Wang, J., Berglund, L. A., Li, Y., Cai, Y., Chen, C., Cranston, E. D., Johns, M. A., Fang, Z., Li, G., Hu, L., Khandelwal, M., Lee, K.-Y., Oksman, K., Pinitsoontorn, S., Quero, F., Sebastian, A., Titirici, M. M., … Frka-Petesic, B. (2022). Current international research into cellulose as a functional nanomaterial for advanced applications. *Journal of Materials Science*, *57*(10), 5697–5767. https://doi.org/10.1007/s10853-022-06903-8

Etale, A., Onyianta, A. J., Turner, S. R., & Eichhorn, S. J. (2023). Cellulose: A Review of Water Interactions, Applications in Composites, and Water Treatment. *Chemical Reviews*, *123*(5), 2016–2048. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00477

Fornari, A., Rossi, M., Rocco, D., & Mattiello, L. (2022). A Review of Applications of Nanocellulose to Preserve and Protect Cultural Heritage Wood, Paintings, and Historical Papers. *Applied Sciences*, *12*(24), 12846. https://doi.org/10.3390/app122412846

Hernández Pérez, R., Álvarez Castillo, A., Olarte Paredes, A., Salgado Delgado, A. M., Hernández Pérez, R., Álvarez Castillo, A., Olarte Paredes, A., & Salgado Delgado, A. M. (2023). Obtención de nanocelulosa a partir de residuos postcosecha. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, *16*(30). https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69662

Karn, A., Thakur, S., & Shrestha, B. (2022). Extraction and Characterization of Cellulose from Agricultural Residues: Wheat Straw and Sugarcane Bagasse. *Journal of Nepal Chemical Society*, *43*(1), 93–98. https://doi.org/10.3126/jncs.v43i1.47034

Kim, G.-W., Lee, Y., Kim, S., Lee, Y. J., Lee, D. Y., Lee, T.-J., & Kim, H. J. (2026). Allomorphic Transformation of Cellulose for Enhancing Enzymatic Accessibility. *Polymers*, *18*(4), 441. https://doi.org/10.3390/polym18040441

Kostryukov, S., Matyakubov, H., Masterova, Y., Kozlov, A., Pryanichnikova, M., Pynenkov, A., & Khluchina, N. (2023). Determination of Lignin, Cellulose, and Hemicellulose in Plant Materials by FTIR Spectroscopy. *Journal of Analytical Chemistry*, *78*, 718–727. https://doi.org/10.1134/S1061934823040093

Lopes, M. S., Carneiro, M. E., Bento, A. V., Potulski, D. C., & Muniz, G. I. B. D. (2021). Production and characterization of nanofibrillated cellulose powder. *Scientia Forestalis*, *49*(129). https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.04

Malyar, Y. N., Sudakova, I. G., Borovkova, V. S., Chudina, A. I., Mazurova, E. V., Vorobyev, S. A., Fetisova, O. Yu., Elsufiev, E. V., & Ivanov, I. P. (2023a). Microfibrillated Cellulose with a Lower Degree of Polymerization; Synthesis via Sulfuric Acid Hydrolysis under Ultrasonic Treatment. *Polymers*, *15*(4), 904. https://doi.org/10.3390/polym15040904

Malyar, Y. N., Sudakova, I. G., Borovkova, V. S., Chudina, A. I., Mazurova, E. V., Vorobyev, S. A., Fetisova, O. Yu., Elsufiev, E. V., & Ivanov, I. P. (2023b). Microfibrillated Cellulose with a Lower Degree of Polymerization; Synthesis via Sulfuric Acid Hydrolysis under Ultrasonic Treatment. *Polymers*, *15*(4), 904. https://doi.org/10.3390/polym15040904

Melesse, G. T., Hone, F. G., & Mekonnen, M. A. (2022). *Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse Optimization and Characterization*. https://doi.org/10.1155/2022/1712207

Presenda-Gerónimo, A., Bolio, G., Veleva, L., Ramírez-Casillas, J., Martínez, O., Hernandez Villegas, M. M., & De la Cruz Burelo, P. (2020). Obtención de celulosa a partir de residuos de piña (Ananas Comosus L. Merril): ISOLATION OF CELLULOSE FROM PINEAPPLE WASTE (Ananas Comosus L.). *AgroProductividad*, *13*. https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1608

Randhawa, A., Dutta, S. D., Ganguly, K., Patil, T. V., Patel, D. K., & Lim, K.-T. (2022). A Review of Properties of Nanocellulose, Its Synthesis, and Potential in Biomedical Applications. *Applied Sciences*, *12*(14), Article 14. https://doi.org/10.3390/app12147090

Seddiqi, H., Oliaei, E., Honarkar, H., Jin, J., Geonzon, L. C., Bacabac, R. G., & Klein-Nulend, J. (2021). Cellulose and its derivatives: Towards biomedical applications. *Cellulose*, *28*(4), 1893–1931. https://doi.org/10.1007/s10570-020-03674-w

Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., & Hussin, M. H. (2020a). Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. *Frontiers in Chemistry*, *8*. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392

Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., & Hussin, M. H. (2020b). Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. *Frontiers in Chemistry*, *8*. https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00392

Valdivieso, J. E. V. (2020). *Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.*

Vegas Niño, R. M., Acosta Arteaga, Y., Escuela de Ingeniería Agroindustrial-Filial Huamachuco, Universidad Nacional de Trujillo-Perú, https://www.unitru.edu.pe/, Fernández Segura, C., & Escuela de Ingeniería Agroindustrial-Filial Huamachuco, Universidad Nacional de Trujillo-Perú, https://www.unitru.edu.pe/. (2024). Obtención, purificación y aprovechamiento de azúcares reductores a partir de materiales lignocelulósicos. *Revista Boliviana de Química*, *41*(2). https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.2.2

Villegas-González, E. E., Ardila-A, A. N., Hernández-Ciro, J. D., Valencia-Duarte, J. S., Villaseñor, E. A.-, Gutiérrez-Pineda, E. A., & Villa, C. C. (2023). Extracción de fibras de celulosa a partir de residuos de pseudotallo de banano y su potencial aplicación en la industria papelera. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, *2*(1), 163–171.

Zambrano Zambrano, G. A., García Macías, V. L., Cedeño Palacios, C. A., & Alcívar Cedeño, U. E. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (Oryza sativa) para la obtención

de fibras de celulosa. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, *6*(4), 415–437.

Zhao, X., Anwar, I., Zhang, X., Pellicciotti, A., Storts, S., Nagib, D. A., & Vodovotz, Y. (2021). Thermal and Barrier Characterizations of Cellulose Esters with Variable Side-Chain Lengths and Their Effect on PHBV and PLA Bioplastic Film Properties. *ACS Omega*, *6*(38), 24700–24708. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03446