



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN PARA LA  
OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS PURAS A PARTIR DEL  
RAQUIS DE BANANO**

**NARVAEZ PACHAR ALLISON KARELYS  
INGENIERA QUIMICA**

**TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN  
PARA LA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS  
PURAS A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO**

**NARVAEZ PACHAR ALLISON KARELYS  
INGENIERA QUIMICA**

**TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2024**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN  
PARA LA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS  
PURAS A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO**

**NARVAEZ PACHAR ALLISON KARELYS  
INGENIERA QUIMICA**

**TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE  
INGENIERA QUIMICA**

**YANEZ ROMERO MARIA ELENA**

**MACHALA  
2024**

# EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS PURAS A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO.

*por Allison Karelys Narváez Pachar*

---

**Fecha de entrega:** 13-ago-2024 07:05a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2431499802

**Nombre del archivo:** TESIS\_FINAL\_NARVA\_Z-TOAPANTA.pdf (15.73M)

**Total de palabras:** 16536

**Total de caracteres:** 85385



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN PARA LA  
OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS PURAS A PARTIR DEL RAQUIS  
DE BANANO.

NARVÁEZ PACHAR ALLISON KARELYS

INGENIERA QUÍMICA

TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE

INGENIERA QUÍMICA

TRABAJO EXPERIMENTAL

TUTOR:

MARIA ELENA YANEZ ROMERO

CO TUTOR:

BYRON LAPO CALDERÓN

MACHALA

2024

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, quienes me incentivaron a ingresar en esta carrera. A mi abuelita, por su constante apoyo y motivación, que han sido fundamentales para alcanzar este logro, a mis hermanos a quienes los amo con todo mi corazón. Un agradecimiento especial a mi novio, quien estuvo conmigo desde primer semestre, este logro también es tuyo, por la fuerza y motivación para culminar la carrera, por creer en mí hasta cuando yo misma dudaba. A mi gatito Simba, quien se encuentra en el cielo, por sus noches de desvelo en este largo proceso y por brindarme todo su cariño. Esta tesis también está dedicada a todos aquellos que han creído en mí y me han impulsado a seguir adelante; cada uno ha dejado una huella imborrable en mi vida.

*Narváez Pachar Allison Karelys*

Con todo mi esfuerzo y amor, dedico este trabajo primeramente a mis padres Hilda Gaona y Cesar Toapanta quienes han sido un pilar fundamental para mí en todo momento, es gracias a ellos que hoy se concreta este logro. A mis hermanos, a quienes quiero con mi corazón, a mi familia, a amigas/os con quienes viví momentos inolvidables e hicieron mi vida universitaria más bonita, a mis ángeles en el cielo que me cuidan y me muestra un camino de luz en momentos de oscuridad, a mi querido Doki que siempre me acompaño y a todas las personas que estuvieron para mí en todo momento apoyándome y deseándome lo mejor.

*Toapanta Gaona Jennifer Nicole*

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profunda gratitud a Dios por mantenerme con salud y rodeado de mis seres queridos. A mis padres, Álvaro Narváez y Margarita Pachar, por ser mi mayor ejemplo y enseñarme a luchar por mis sueños. A mi abuelita, Elvira Orellana, por brindarme su sabiduría y enseñarme a valorar cada aspecto de mi vida. A mi novio, Walter Peña, por su amor incondicional y por ser mi motor a lo largo de mi carrera, y enseñarme que soy capaz de lograr todo lo que me proponga, motivándome así a ser mejor cada día.

Agradezco especialmente a mi tutora, Ing. María Elena Yáñez, y mi Co-tutor Dr. Byron Lapo, por su paciencia y dedicación durante nuestro trabajo de titulación. También extiendo mi agradecimiento a todos los docentes que contribuyeron a este logro, especialmente aquellos que forjaron mis conocimientos desde el primer semestre, y a mis amigas Doménica Gómez, Allison Chica, Evelyn Morocho y Jennifer Toapanta, por su sincera amistad desde primer semestre, su apoyo incondicional durante este proceso y por ayudarme a no rendirme en el transcurso de este largo camino. Gracias a todos, sin ustedes no hubiera sido posible este logro.

*Narváez Pachar Allison Karelys*

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud y guiarme en este proceso. De la misma manera expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres Hilda Gaona y Cesar Toapanta, por su amor y apoyo incondicional, por enseñarme a seguir mis sueños y hacer posible este logro. Agradezco a mis hermanos, por creer en mí, por sus palabras de aliento y por su apoyo constante, a mis abuelitos por su cariño y por estar conmigo incluso si no los puedo ver.

Agradezco a mi tutora Ing. María Elena Yáñez y a mi co-tutor Dr. Byron Lapo, quienes nos han guiado de la mejor manera en este proceso de titulación, también agradezco a todos mis docentes quienes han sido parte de mi formación académica y mostraron que en la universidad podemos encontrar a profesionales con calidez humana. Finalmente, a mis amigas Allison Narváez, Allison Chica y Evelyn Morocho quienes estuvieron conmigo a lo largo de mi vida universitaria, apoyándome y ayudándome cuando lo necesite, demostrando que las verdades amistades perduran a lo largo del tiempo. A todos ustedes, les debo este logro y mi más sincero agradecimiento.

*Toapanta Gaona Jennifer Nicole*

## RESUMEN

El desarrollo de materiales a partir de residuos es una alternativa sostenible para reducir la contaminación, debido a que aprovechan estos desechos dándoles un nuevo uso. El presente trabajo de investigación se enfoca en la evaluación de los diferentes métodos de extracción para la obtención de nanofibras de celulosa puras a partir del raquis de banano, para ello se aplicaron los métodos de extracción biológicos, físicos y químicos.

En el método químico, se realizó tratamiento alcalino con NaOH, seguido de un blanqueamiento con NaOH+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y finalmente se hizo una hidrólisis ácida con HCl. En el método biológico, se empleó el hongo *Trichoderma spp* para inocular el raquis de banano; en el tratamiento físico se empleó el uso de un reactor hidrotermal, sumergiendo así el raquis de banano junto con NaOH.

Las nanofibras de celulosa obtenidas se clasificaron de la siguiente manera: NFC-BFQ (combinación de métodos: enriado biológico, explosión de vapor y tratamiento químico), NFC-FQ (aplicación de métodos: explosión de vapor y tratamiento químico), NFC-BQ (unión de métodos: enriado biológico y tratamiento químico) y NFC- Q (por tratamiento químico), estos métodos se combinaron para evaluar su efectividad y caracterizarlas.

La caracterización se realizó mediante la determinación del potencial de carga cero pH<sub>PCC</sub>, espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (EITF) para la identificar grupos funcionales presentes en las NFC, Microscopia electrónica de barrido (MEB) para determinar la morfología de las NFC y análisis de la viabilidad económica.

Según los espectros EITF, el método NFC-BQ muestra el menor estiramiento en el rango de 1600 cm<sup>-1</sup> a 800 cm<sup>-1</sup>, en comparación con los otros métodos. Esto sugiere que el método NFC-BQ tiene la menor concentración de celulosa y lignina, ya que los picos asociados a estos componentes son menos prominentes en este espectro.

Las nanofibras extraídas por el método NFC-BQ, con un pH<sub>pcc</sub> mayor en referencia a los otros NFC, estas serán adecuadas para aplicaciones en medios ácidos, mientras que las obtenidas por el método NFC-Q, con un pH<sub>pcc</sub> más bajo, serán más efectivas en medios con ph más ácidos, debido a que favorece la adsorción de cationes.

Aunque los métodos combinados pueden ofrecer ventajas en términos de pureza y características específicas de las nanofibras, el método químico sigue siendo el más rentable para la producción de NFC a gran escala.

**Palabras claves:** Raquis de banano, Nanofibras de celulosa, métodos de extracción, caracterización, celulosa, EITF, MEB, pH<sub>PCC</sub>

## ABSTRACT

The development of materials from waste is a sustainable alternative to reduce pollution, because they take advantage of this waste by giving it a new use. The present research work focuses on the evaluation of the different extraction methods to obtain pure cellulose nanofibers from the banana rachis, from which biological, physical and chemical extraction methods were applied.

In the chemical method, alkaline treatment with NaOH was performed, followed by bleaching with NaOH+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and finally acid hydrolysis with HCl. In the biological method, the fungus *Trichoderma* spp was used to inoculate the banana rachis; in the physical treatment he employed the use of a hydrothermal reactor, thus submerging the banana rachis together with NaOH.

In the biological method, the fungus *Trichoderma* spp was used to inoculate the banana rachis; in the physical treatment he employed the use of a hydrothermal reactor, thus submerging the banana rachis together with NaOH.

The cellulose nanofibers obtained were classified as follows: NCF-BFQ (combination of methods: biological retting, steam explosion and chemical treatment), NCF-FQ (application of methods: steam explosion and chemical treatment), NCF-BQ (union of methods: biological retting and chemical treatment) and NCF-Q (by chemical treatment), these methods were combined to evaluate their effectiveness and characterize them.

The characterization was carried out by determining the zero-charge potential pH<sub>pcc</sub>, Fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR) for the identification of the functional groups present in NCFs, Scanning Electron Microscopy (SEM) to determine the morphology of NFCs and analysis of economic feasibility (production costs).

According to FTIR spectra, the NFC-BQ method shows the lowest stretch in the range of 1600 cm<sup>-1</sup> to 800 cm<sup>-1</sup>, compared to the other methods. This suggest that the NCF-BQ method has the lowest concentration of cellulose and lignin, as peaks associated with these componentes are less prominent in the spectrum.

Although combined methods can offer advantages in terms of purity and specific characteristics of nanofibers, the chemical method remains the most cost-effective for large-scale NFC production.

Keywords: Banana rachis, Cellulose nanofibers, extraction methods, characterization, cellulose, FTIR, SEM, pH<sub>pcc</sub>.

## CONTENIDO

	pág.
OBJETIVOS	12
OBJETIVO GENERAL:	12
OBJETIVO ESPECIFICO:	12
CAPITULO I	13
1. MARCO TEORICO	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Residuos agrícolas	14
1.3 Residuos agrícolas de la industria bananera	14
1.3.1 <i>Contaminación ambiental por residuos de banano.</i>	15
1.4 Descripción de la planta de banano	15
1.4.1 <i>Raquis de banano.</i>	15
1.5 Materia lignocelulósica	15
1.5.1 <i>Componentes de la materia lignocelulósica</i>	16
1.5.1.1 <i>Celulosa.</i>	16
1.5.1.2 <i>Lignina.</i>	17
1.5.1.3 <i>Hemicelulosa.</i>	18
1.6 Nanocelulosa	18
1.6.1 <i>Celulosa bacteriana.</i>	19
1.6.2 <i>Nanocristales de celulosa.</i>	19
1.6.3 <i>Nanofibras de celulosa.</i>	19
1.6.3.1 <i>Propiedades.</i>	20
1.6.3.2 <i>Aplicaciones industriales.</i>	20
1.7 Métodos de extracción	21
1.7.1 <i>Métodos químicos.</i>	21
1.7.1.1 <i>Tratamiento alcalino.</i>	21
1.7.1.2 <i>Blanqueamiento.</i>	22
1.7.1.3 <i>Hidrólisis ácida.</i>	22
1.7.2 <i>Métodos físicos.</i>	22
1.7.2.1 <i>Explosión de vapor.</i>	22
1.7.3 <i>Métodos biológicos.</i>	23
1.7.3.1 <i>Enriado biológico al aire libre.</i>	23
1.7.4 <i>Combinación de los métodos.</i>	24
1.8 Caracterización de las nanofibras de celulosa	24
1.8.1 <i>Microscopia electrónica de barrido (MEB).</i>	24
1.8.2 <i>Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).</i>	25
1.8.3 <i>Potencial de Carga cero.</i>	26

1.9 Viabilidad Económica	27
1.9.1 CAPEX.	27
1.9.2 OPEX.	27
CAPITULO II	28
2. METODOLOGÍA	28
2.1 Tipo de investigación	28
2.2 Diseño de investigación	28
2.3 Enfoque de investigación	28
2.4 Ubicación Geográfica	28
2.5 Población de estudio	28
2.6 Materiales, reactivos y equipos	29
2.7 Desarrollo experimental	30
2.7.1 Preparación de la muestra.	30
2.7.2 Métodos de obtención de nanofibras de celulosa.	31
2.7.2.1 Método 1 - Tratamiento químico (Q).	31
2.7.2.2 Método 2 - Enriado biológico y tratamiento químico (BQ).	33
2.7.2.3 Método 3 - Explosión de vapor y tratamiento químico (FQ).	37
2.7.2.4 Método 3 - Enriado biológico, Explosión de vapor, Tratamiento químico (BFQ).	39
2.8 Caracterización del material	41
2.8.1 Potencial de carga cero (pHpcc).	41
2.8.2 Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).	42
2.8.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB).	42
CAPITULO III	43
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1 Caracterización de las nanofibras de celulosa	43
3.1.1 Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).	43
3.1.2 Potencial de carga cero (pHpcc).	44
3.1.3 Microscopía de Barrido (MEB).	45
3.1.4 Viabilidad Económica.	48
ANEXOS	61

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales bandas de los espectros FTIR para las NFC	25
Tabla 2. CAPEX OPEX – Costos fijos/variables	27
Tabla 3 Descripción de los materiales, reactivos y equipos a utilizar.	29

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Componentes del material lignocelulósico	16
Figura 2 Estructura de cadena de celulosa	17
Figura 3 Estructura de cadena de lignina	17
Figura 4 Estructura de cadena de hemicelulosa	18
Figura 5. Obtención del polvo del raquis de banano	30
Figura 6. Diagrama de flujo de tratamiento químico	31
Figura 7. Diagrama de flujo para la obtención de nanofibras por enriado biológico y tratamiento químico	33
Figura 8. Diagrama de Explosión de Vapor	37
Figura 9. Diagrama de Enriado Biológico	41
Figura 10. Espectro FTIR de nanofibras de celulosa	43
Figura 11. Potencial de carga cero de las nanofibras de celulosa como bioadsorbentes	44
Figura 12. Micrografía SEM de NFC-Q de raquis de banano	46
Figura 13. Micrografía SEM de NFC-BFQ de raquis de banano	46
Figura 14. Micrografía SEM de NFC-BQ de raquis de banano	47
Figura 15. Micrografía SEM de NFC-FQ de raquis de banano	47
Figura 16. Costos de producción para obtener 5 g de NFC por cada uno de métodos.	48

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la ciencia ha evolucionado centrándose en el aprovechamiento de residuos agrícolas, con el fin de revertir la contaminación ambiental y mejorar la disposición de los desechos agroindustriales.<sup>1</sup>

La actividad agrícola desempeña un papel fundamental en los países subdesarrollados que se dedican principalmente en la producción y exportación de alimentos, siendo el banano uno de estos productos.<sup>2</sup> En la actualidad, Ecuador es considerado como uno de los principales exportadores de banano del mundo. No obstante, el crecimiento de esta actividad ha dado lugar a un incremento significativo de residuos, según el Banco Central del Ecuador (2019).<sup>3</sup>

Los desechos de este monocultivo ocasionan contaminación ambiental, ya sea por su quema o inadecuada disposición, dado que el proceso de postcosecha aprovecha solo entre el 20% y el 30% de la biomasa, dejando sin utilizar aproximadamente el 70% y 80%, lo que propicia la proliferación de plagas y degradación del ecosistema.<sup>4</sup> Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), en el año 2023, se han producido 6.07 millones de toneladas de banano;<sup>5</sup> sin embargo, debido a la gran cantidad de fruta que se produce en el territorio, se genera una elevada concentración de residuos. En Ecuador, el inadecuado manejo de los residuos naturales ha llevado a una mala disposición de estos, dando como resultado una fuente elevada de contaminación.<sup>6</sup>

El raquis, el tallo que sostiene los frutos, constituye uno de estos residuos generados por la Industria Bananera; por su contenido rico en celulosa se impulsa a la búsqueda de alternativas para su aprovechamiento, dado que presenta la posibilidad de utilizarlas como materia prima en la fabricación de diversos productos.<sup>1,7</sup> Es por ello que ofrece una oportunidad para la extracción de nanofibras de celulosa las mismas que tienen un alto impacto en diversas industrias, debido a que presentan propiedades como alta resistencia, rigidez, bajo costo de materia prima, y biodegradabilidad, cualidades que las hacen versátiles en diversas aplicaciones industriales.<sup>1,8</sup>

La extracción de las nanofibras de celulosa se realiza por diferentes métodos, como el método biológico donde se lleva a cabo el enriado biológico en el cual por la ayuda del hongo *Trichoderma (spp)* se hidroliza los componentes de materia lignocelulósica; por otro lado, en el método físico se realiza la explosión de vapor mediante el uso de un reactor hidrotermal donde se somete la muestra a condiciones de presión y altas temperaturas, lo que permite que exista una desfibrilación de las fibras lignocelulósicas. Adicional a estos en el método químico, se aplican una serie de tratamientos químicos

con NaOH, HCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, lo que posibilita la hidrólisis de la celulosa y degradación de los componentes no celulósicos. En la práctica se realiza una combinación de métodos, debido a que el método biológico y el método físico actuarán como un pretratamiento de la biomasa, luego de esto se someterá al método químico, con la finalidad de comparar si existen diferencias significativas en la calidad del producto al aplicar los métodos de pretratamiento mencionado previamente.

Por esta razón, <sup>30</sup> el presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar los diferentes métodos de extracción (físico, químico y biológico) para la obtención de nanofibras de celulosa, a partir del raquis del banano, además, al conocer su composición química, estructura morfológica y sus propiedades físicas, se realizará la caracterización de las nanofibras de celulosa empleando diferentes técnicas para apreciar sus posibles diferencias en cuanto al producto que se obtenga por cada uno de los diferentes métodos de extracción, con esto podemos identificar los métodos más eficientes para su extracción y maximizar su rendimientos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar los diferentes métodos de extracción para la obtención de nanofibras de celulosas más puras a partir del raquis de banano.

### **OBJETIVO ESPECIFICO:**

- Extraer nanofibras de celulosa del raquis de banano mediante métodos físicos, químicos y biológicos.
- Caracterizar las nanofibras de celulosa obtenidas mediante distintos métodos de extracción.
- Evaluar la viabilidad económica de los métodos de extracción.

## CAPITULO I

46

### 1. MARCO TEORICO

#### 1.1 Antecedentes

A nivel mundial por cada año se producen cerca de 2000 millones toneladas de residuos de los cuales el 50% son residuos orgánicos.<sup>9</sup> Estos residuos se generan por la actividad agrícola, hogares y por diferentes procesos industriales.

Dentro de las actividades agrícolas se encuentra la producción de banano que durante el transcurso del tiempo ha aumentado a nivel mundial, siendo uno de los cultivos más importantes alrededor del mundo.<sup>19</sup> Ecuador es uno de los principales países exportadores de banano en el mundo, siendo así que el 29% de la oferta de este fruto proviene de este país. El banano que crece en racimos y su planta produce frutos una sola vez en su vida, que por su naturaleza a nivel nacional se lo cultiva primordialmente en la zona costera, ya que es un cultivo de clima tropical.<sup>10</sup>

Durante los últimos 5 años a nivel nacional se ha tenido ciertas fluctuaciones en cuanto a la cantidad de la producción de este monocultivo, por ejemplo, en el 2018 tuvo una producción nacional de 6.5 millones de toneladas, mientras que en el 2023 decreció a 6.07 millones de toneladas, esto debido a que la demanda que se vio afectada por factores como la pandemia de COVID 19 y enfrentamientos geopolíticos internacionales entre los países consumidores de este fruto.<sup>11</sup> A pesar de esto se mantiene una gran producción a nivel nacional de este monocultivo, debido a la gran cantidad de banano que se produce, genera una elevada cantidad de residuos.

La cosecha produce residuos lignocelulósicos al cortar la planta, como hojas, raquis, tallo, y la proporción que existe entre residuos y banano es de 2:1. Los residuos agrícolas orgánicos provenientes de esta industria, en su mayoría son sólidos, que se pueden degradar o descomponer, ya sea en el suelo o en vertederos a cielo abierto.<sup>10,12</sup> Sin embargo, debido a la falta de conocimiento en cuanto a la correcta gestión de desechos y la falta de un buen control de los mismos, ocasiona un problema de contaminación ambiental, como la generación de gases de efecto invernadero, malos olores y proliferación de plagas.<sup>13</sup>

Estos desechos se pueden aprovechar para la generación de energía, la creación de bioetanol o biogás, además debido a su contenido de material lignocelulósico, el cual sirve como materia prima obtención de celulosa, que a su vez sirve para la obtención de

nanofibras de celulosa, estas se componen de pequeñas fibras en forma de hilos, largas y flexibles.<sup>13</sup>

Las nanofibras tienen una gran acogida en la actualidad por los múltiples usos que se le pueden dar a la misma, por su versatilidad, eficiencia y bajo costo, estos materiales se pueden utilizar como mejorador de propiedades mecánicas y material de refuerzo en las mezclas de cemento, en la industria alimentaria para empaques, así como posibles remediadores ambientales para ayudar en la descontaminación de aguas como absorbentes de metales pesados, además, entre otras.<sup>14</sup> Contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental, puesto que se transforma un desecho en un nuevo producto con valor agregador y que no es dañino para el medio ambiente.

## **1.2 Residuos agrícolas**

La actividad agrícola genera una cantidad significativa de residuos proveniente <sup>58</sup> de las diferentes etapas del proceso de producción, que al momento de desecharlos no poseen valor agregado, tales como: hojas, tallos, semillas, raíces, cascaras, entre otros,<sup>5,7</sup> estos residuos al ser materiales lignocelulósicos contienen celulosa (40-50%), lignina (15–20%) y hemicelulosa de (25–35%), dependiendo del origen y la genética de la planta, estos valores pueden variar.<sup>15</sup>

La celulosa que se está contenida en los residuos agrícolas se puede recuperar, produciendo así un subproducto de mayor valor y que se puede utilizar como base para diferentes procesos industriales, convirtiéndose en recursos potencialmente valiosos para la economía circular.<sup>5,7</sup> Lo cual al mismo tiempo ayuda a mitigar la contaminación ambiental provocada por la incorrecta gestión de los desechos.<sup>16</sup>

## **1.3 Residuos agrícolas de la industria bananera**

Los desechos de banano se generan a lo largo del tiempo de vida productiva de la planta, en distintas etapas del proceso de producción.<sup>17</sup> Durante la etapa de cosecha y postcosecha se producen desechos como: pseudotallo, hojas, raquis y los frutos denominados descarte que son los bananos que no cumple con las especificaciones para la exportación.<sup>13</sup>

De acuerdo con Fernández, Marangoni, Souza y Sellin, por cada tonelada de bananos producidos se generan alrededor de 100 kilogramos de desechos frutales y cerca de 4 toneladas de desechos lignocelulósicos, entre los cuales se produce aproximadamente: 2920 kg pseudotallos (73%), 480 kg hojas (12%) y 150 kg raquis (3.75%).<sup>18</sup>

1.3.1 *Contaminación ambiental por residuos de banano.* El sector bananero es un generador potencial de residuos vegetales durante el proceso de cosecha, dado que no consume todas las partes de la planta, quedando así una gran cantidad del mismo sin un uso, como los tallos, hojas y raquis, de manera que al incrementar en la producción del cultivo, se aumenta la generación de desecho y por la ejecución inadecuada de estos residuos pueden desencadenar problemas de contaminación ambiental,<sup>19</sup> debido a que por su mala disposición, se produce la descomposición masiva de los mismos, con la quema de los desechos se ocasiona el surgimiento de gases de efecto invernadero, así como enfermedades que impactan en la salud humana y a la fauna. En este sentido, el correcto manejo de desechos orgánicos está ganando importancia día a día.<sup>11</sup>

#### 1.4 Descripción de la planta de banano

<sup>21</sup> El banano es una de las frutas más consumidas a nivel mundial, por su característico sabor y aroma, además de minerales esenciales como K, Ca, P.<sup>20</sup> Este monocultivo se da en zonas de clima tropical y subtropical, proveniente de la familia de las musáceas. Es una planta herbácea megafobia perenne, lo que quiere decir que esta planta no cuenta con un tallo leñoso, puede crecer entre 3.5 a 7.5 metros, y tiene largos periodos de vida no obstante solo produce fruto una vez a largo de su vida productiva.<sup>18,21</sup>

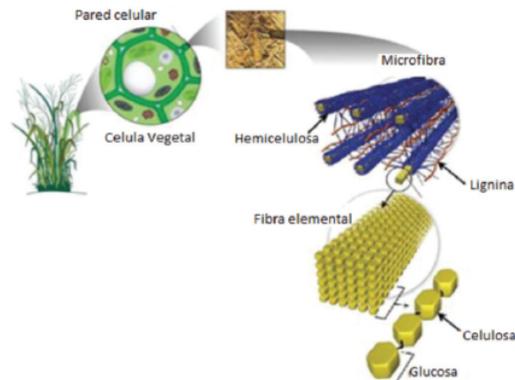
1.4.1 *Raquis de banano.* El raquis también conocido como pinzote o vástago, es la parte que sostiene los frutos. Morfológicamente el raquis en su exterior exhibe una corteza verde delgada y uniforme, de unos 2.5 cm de espesor, posee diminutos vellos en su superficie, mientras que, en el interior de la corteza del raquis, se hallan fibras largas dispuestas en sentido longitudinal, de un tono blanco cuando no han comenzado a descomponerse, conservando una alta humedad.<sup>21</sup> Además es considerado como un subproducto de la cosecha del mismo. El raquis compuesto por agua (93%), materia sólida (7%), este % de materia sólida el 40% es fibra, 53% celulosa y 11.7% lignina, es por ello que se dice que es un residuo con alto contenido de celulosa con el cual se puede producir diferentes productos.<sup>22</sup>

#### 1.5 Materia lignocelulósica

El componente lignocelulósico, principalmente integrado por celulosa, hemicelulosa y lignina, exhibe una composición que fluctúa según la genética de las plantas, las condiciones ambientales y los procesos de producción.<sup>23</sup> Este recurso despierta un interés considerable por su potencial versátil en diversos ámbitos, resaltando su proporción aproximada del 40-60 % en celulosa, 30-40 % en hemicelulosas y 10-25 %

en lignina, cifras que pueden variar dependiendo de la naturaleza del material. Esta flexibilidad lo posiciona como un componente esencial en la industria, donde su utilización puede ser clave en la fabricación de productos y materiales respetuosos ambiente.<sup>14</sup>

Figura 1. Componentes del material lignocelulósico



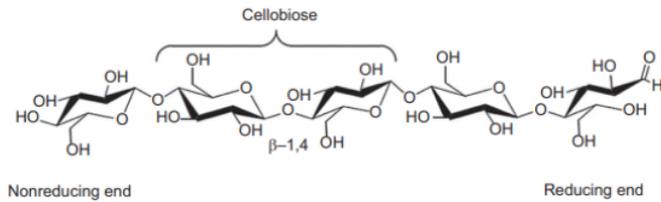
<sup>7</sup> Fuente: Evaluación Del Desempeño Del Pretratamiento Con Peróxido de Hidrógeno Sobre Bagazo de Caña de Azúcar Para Remoción de Lignina.<sup>24</sup>

### 1.5.1 Componentes de la materia lignocelulósica

<sup>12</sup> 1.5.1.1 **Celulosa.** La celulosa es considerada como un polímero natural, con una estructura cristalina, que está constituido por la unión de monosacáridos y por unidades de glucosa, aproximadamente de <sup>1</sup> 3000 a 10000 unidades de glucosa, además es considerada una fibra que aporta propiedades estructurales en las paredes de las células vegetales, dado que posee una resistencia mecánica alta y una estabilidad química.<sup>25</sup>

<sup>2</sup> Las cadenas de celulosa se alinean en paralelo mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, lo que resulta en una estructura cristalina. La conversión de celulosa en glucosa ha sido objeto de investigación debido a que la glucosa resultante puede emplearse para la producción de diversos biocombustibles, como el bioetanol.<sup>26</sup>

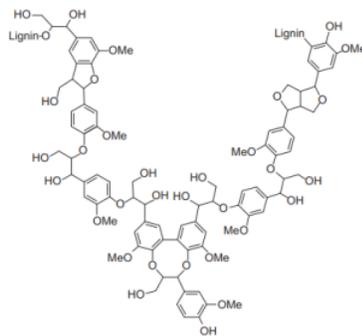
Figura 2. Estructura de cadena de celulosa



Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composite<sup>27</sup>

1.5.1.2 *Lignina* <sup>5</sup> La lignina, un polímero con propiedades aromáticas, surge de la polimerización deshidrogenativa de tres alcoholes fenilpropiónicos (P-cumarílico, coniferílico y sinapílico). La unión entre los distintos monómeros ocurre mediante enlaces carbono-carbono y enlaces tipo éter entre los anillos aromáticos, y los radicales de la misma. Su composición varía notablemente entre especies vegetales; se halla químicamente entrelazada y mezclada con la celulosa y la hemicelulosa, en especial con esta última. La lignina actúa como un escudo protector que resguarda la celulosa de diversos ataques y de la descomposición natural de la planta. Es responsable principal de la resistencia de las paredes celulares vegetales y se concentra mayormente en la lámina media, donde puede llegar a constituir hasta el 75% del total. Además, puede brindar defensa contra patógenos y daños mecánicos.<sup>25</sup>

Figura 3. Estructura de cadena de lignina

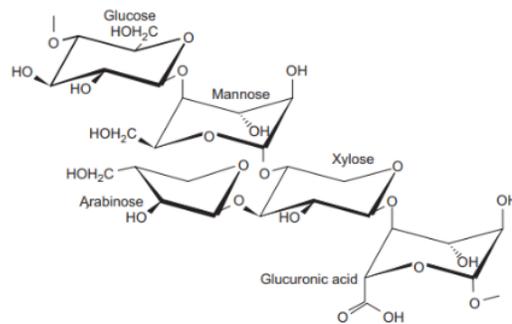


Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites.<sup>27</sup>

1.5.1.3 *Hemicelulosa*. La hemicelulosa es considerada el segundo polisacárido más común en la naturaleza, posee una estructura amorfa, es conocida como un grupo de heteropolisacárido, compuesta por azúcares tales como; la xilosa, arabinosa, galactosa y manosa. Se presenta en las paredes celulares de las plantas, la hemicelulosa genera un gel acuoso el cual envuelve las microfibrillas de celulosa.<sup>25</sup>

En comparación con la celulosa, la hemicelulosa posee una masa molecular más baja, está constituida por cadenas laterales cortas como ramificadas de diferentes polímeros de azúcares lo cual facilita su descomposición mediante hidrólisis. Además, su estructura y composición pueden variar significativamente entre diferentes especies vegetales.<sup>26</sup>

Figura 4. Estructura de cadena de hemicelulosa



Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composite.<sup>27</sup>

## 1.6 Nanocelulosa

La nanocelulosa es un material de valor agregado que se deriva de la celulosa, la cual puede ser obtenida de residuos agrícolas, mediante a diferentes métodos de extracción, ya sean físicos, químicos o biológicos, y su dimensión deben estar comprendidos dentro del rango de los nanómetros.<sup>28</sup> Durante los últimos años, el desarrollo de las nanofibras de celulosa ha captado el interés científico e industrial, debido a sus propiedades, como su baja densidad, alta biodegradabilidad, resistencia, flexibilidad y rigidez, entre otros; lo que hace que este material sea muy versátil para la aplicación en diferentes procesos.<sup>16</sup>

Las nanocelulosas dependido del método de extracción, su morfología, y funcionalidad, se subdivide en los siguientes tipos: nanocelulosa bacteriana (Bacterial Nanocellulose - BNC), nanofibras de celulosa (Cellulose Nanofibers - CNF) y nanocristales de celulosa (Cellulose Nanocrystals - CNC).<sup>29</sup>

*1.6.1 Celulosa bacteriana.* La nanocelulosa bacteriana (NCB), son fibras torcidas, que tienen forma de cinta. La celulosa que se requiere para producir las nanocelulosa, es obtenida por la secreción de bacterias aeróbicos (crecer en presencia de oxígeno), como las que pertenecen a los géneros *Acetobacter xylinum* y *Gluconacetobacter xylinus*, además de *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Sarcina* o *Alcaligenes*, estas bacterias usan como sustrato azúcares monoméricos o monosacáridos de bajo peso molecular.<sup>29,30</sup> Este tipo de nanocelulosa tiene un alto grado de cristalinidad (84% - 89%), polimerización y pureza.<sup>31</sup>

Las nanocelulosas bacterianas eran costosas de obtener debido a los cultivos de la bacteria, no obstante, se observó que los residuos lignocelulósicos agroindustriales son una buena fuente de carbono para la fermentación y el crecimiento de las bacterias. Con el aprovechamiento de un residuo los costos de obtención de este material se reducen lo que hace que sean atractiva para desarrollar, y aplicarla para procesos como: membranas de parlantes, piel artificial, células de bicomcombustibles, entre otros.<sup>16</sup>

*1.6.2 Nanocristales de celulosa.* Los nanocristales de celulosa (NCC), son partículas sólidas en forma de varilla, con un rango en sus dimensiones que van de 100 a 500 nm de largo y 5 a 15 nm de ancho, dependiendo de su origen y su tratamiento pueden tener una pureza del 90%.<sup>30</sup> Los CNC generalmente se obtienen por hidrólisis con ácidos inorgánicos fuertes, como: ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico, ácido bromhídrico y ácido nítrico, con este proceso se aísla la celulosa, con la cual se deja región cristalina, disolviendo la región amorfa y los componentes no celulósicos.<sup>29</sup>

*1.6.3 Nanofibras de celulosa.* Las nanofibras de celulosa (NFC), son diminutas fibras en forma de hilos largos y flexibles, compuestas por dominios alternados cristalinos (estructura ordenada) y amorfos (estructura desordenada que le da la flexibilidad), entre sus dimensiones tienen un diámetro de 1 - 100 nm y una longitud de 500 - 2000 nm.<sup>16</sup> Además, se encuentran entrelazadas, tienen la capacidad de formar redes densas unidas fuertemente por enlaces de hidrogeno interfibrilar. Se obtiene principalmente, por métodos mecánicos, y se caracteriza por tener excelentes propiedades como:

resistencia mecánica, presenta un carácter hidrofílico, alta cristalinidad, gran área superficial, transparencia, elevada rigidez.<sup>8</sup>

**1.6.3.1 Propiedades.** Este revolucionario material sustentable, con una amplia gama de propiedades sobresalientes, se destaca en el ámbito de la ingeniería y la ciencia de los materiales. Su capacidad para ser dimensionado a una escala nanométrica les confiere versatilidad y adaptabilidad a diversas aplicaciones, mientras que exhibe una rigidez excepcional y una estabilidad notable en ambientes adversos y temperaturas elevadas. Esto lo convierte en una opción ideal para entornos de alta exigencia. Su superficie altamente modificable y su estructura cristalina ofrecen oportunidades únicas para la ingeniería de materiales a medida y aplicaciones avanzadas. Además, su destacada resistencia específica lo hace altamente durable y confiable en condiciones extremas.<sup>28</sup>

Por otro lado, este material se distingue por su baja conductividad térmica renovable, lo que no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también amplía su potencial de aplicación en áreas donde el control térmico es crucial. A pesar de estas cualidades sobresalientes, es accesible en costos, lo que lo convierte en una opción atractiva desde una perspectiva técnica y económica. Es importante tener en cuenta que la complejidad de este material varía dependiendo de las características específicas de la materia prima utilizada y de los procesos de fabricación empleados.<sup>28</sup>

**1.6.3.2 Aplicaciones industriales.** Las nanofibras de celulosa se están utilizando cada vez más en una variedad de aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas. Según un artículo publicado en "Industrial Crops and Products", estas aplicaciones incluyen:<sup>32</sup>

- Refuerzo de materiales compuestos. Las nanofibras de celulosa pueden incorporarse en matrices poliméricas para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, como la resistencia y la rigidez. Esto los hace útiles en la fabricación de productos como componentes automotrices y aeroespaciales.<sup>28</sup>
- Embalaje sostenible. Las nanofibras de celulosa pueden utilizarse para desarrollar materiales de embalaje biodegradables y compostables, ofrecen una alternativa ecológica a los plásticos convencionales y son adecuados para aplicaciones de embalaje en diversos sectores industriales.<sup>22</sup>
- Filtración y separación. Las nanofibras de celulosa tienen una estructura porosa que las hace efectivas para la filtración de líquidos y gases. Se utilizan en

aplicaciones como la purificación de agua, la filtración de aire y la separación de componentes en procesos industriales.

- Recubrimientos funcionales. Las nanofibras de celulosa pueden formar recubrimientos delgados con propiedades barrera y antimicrobianas, se aplican en envases de alimentos, productos farmacéuticos y textiles para mejorar su durabilidad y seguridad.
- Electrónica flexible. Las nanofibras de celulosa se están explorando como sustratos flexibles para dispositivos electrónicos, como pantallas y sensores. Su alta transparencia óptica y flexibilidad los hacen prometedores para aplicaciones en electrónica portátil y dispositivos médicos.
- En medicina y biomedicina, se emplea en la creación de piel artificial para tratar quemaduras y úlceras, así como en la entrega controlada de medicamentos y en apósitos antimicrobianos para heridas.
- En cosmética, su papel <sup>4</sup> como estabilizador de emulsiones se destaca en la formulación de cremas y tónicos. En la industria alimentaria, se utiliza para producir celulosa comestible, como la nata de coco.<sup>32</sup>
- Industria del papel, mejora la flexibilidad y durabilidad de los productos,
- Construcción y los polímeros, actúa como material de refuerzo,
- Electrónica, se emplea en la fabricación de componentes opto-electrónicos.<sup>33</sup>

De tal forma, se puede mencionar que, las nanofibras de celulosa <sup>17</sup> tienen un gran potencial para una amplia gama de aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas y su sostenibilidad ambiental. Su uso está en aumento en sectores como la automoción, el embalaje, la filtración, los recubrimientos y la electrónica.<sup>32</sup>

## 1.7 Métodos de extracción

**1.7.1 Métodos químicos.** En los métodos químicos se usan diferentes tipos de ácidos, bases y disolventes, tanto diluidos como concentrados, para eliminar impurezas propias del material lignocelulósico y degradar los componentes no celulósicos.<sup>27</sup>

**1.7.1.1 Tratamiento alcalino.** El tratamiento alcalino se lo emplea en materiales lignocelulósicos para la descomposición de su estructura cristalina, estos materiales (fibras naturales) se introducen en una solución de NaOH a un tiempo y temperatura determinada, mediante este proceso se altera la superficie de las mismas, eliminando

los componentes no celulósicos como la lignina y hemicelulosa. Después de este tratamiento las fibras se vuelven amarillas cuando la concentración del NaOH aumenta, es por ello que requiere de otro tratamiento químico como es el blanqueamiento.<sup>27</sup>

1.7.1.2 *Blanqueamiento*. Generalmente las etapas de blanqueo de celulosa son tratamientos ácidos o alcalinos y se utilizan productos químicos como: **clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>)**, **hipoclorito de sodio (NaClO)** y peróxido (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), sobre parámetros de presión y temperatura atmosféricas lo cual provoca la degradación de la lignina cambiando su estructura, incluyendo también a la celulosa y hemicelulosa pues los enlaces participantes éster y glucosídicos se ven afectados.<sup>34</sup>

1.7.1.3 *Hidrólisis ácida*. Se conoce que la hidrólisis ácida es favorable para la obtención de azúcares fermentables, en el cual varían ciertas condiciones tales como la concentración y la temperatura<sup>35</sup> participan sustancias ácidas concentradas o en dilución entre **ácido nítrico HNO<sub>3</sub>**, **ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**, **ácido clorhídrico HCl**, **ácido fosfórico H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**, para la descomposición de la celulosa, hemicelulosa separando de tal manera, a su forma elemental.<sup>28,35</sup>

La hidrólisis ácida provoca una protonación rápida del oxígeno glucosídico, lo que provoca la adición de agua para romper el enlace y producir dos fragmentos de cadena más cortos.<sup>36</sup>

1.7.2 *Métodos físicos*. Los métodos físicos son fundamentales para la modificación de la estructura de la biomasa, aumentando el área superficial reduciendo el tamaño de partículas, mediante una serie de pasos sencillos como molienda, trituración y pulverización de la materia, así como el secado, microondas, explosión de vapor, etc.<sup>37</sup>

1.7.2.1 *Explosión de vapor*. La explosión de vapor es un pretratamiento de origen hidrotermal, con el cual se somete el material lignocelulósico, a presión de vapor y altas temperaturas, con el que se consigue la despolimerización de la lignina, haciendo que salgan las fibras de celulosa.<sup>37</sup>

Se destaca como **uno de los pretratamientos más eficaces para maderas duras y residuos agrícolas**, aunque su eficiencia es menor en el caso de maderas blandas. La biomasa se somete a vapor saturado a temperaturas que oscilan entre 160-260 °C (0.69-4.83 MPa). En el transcurso de la detonación de vapor, se generan **ácido acético y otros ácidos orgánicos** mediante la hidrólisis **de la hemicelulosa**, contribuyendo así a la ruptura de los enlaces éster y éter en la matriz de celulosa-hemicelulosa-lignina. Los

factores que influyen en este proceso incluyen el tiempo de tratamiento, la temperatura, el tamaño de las partículas y el contenido de humedad.<sup>38</sup>

Este se ha convertido en un método de pretratamiento popular debido a su bajo uso de productos químicos y bajo consumo de energía, debido a que se obtienen los mismos tamaños que con los métodos físicos, no obstante, se requiere 70% menos de energía.<sup>38</sup>

### 1.7.3 Métodos biológicos.

1.7.3.1 *Enriado biológico al aire libre.* Este método de enriamiento, caracterizado por su bajo costo, implica exponer las vainas de plátano al ambiente exterior, permitiendo que los microorganismos presentes en el proceso de descomposición separen los haces fibrilares. Sin embargo, esta técnica conlleva la consecuencia de que las fibras extraídas presenten variaciones en sus propiedades, dado que las condiciones de temperatura y humedad no son consistentes. Como resultado, la calidad de la fibra puede verse comprometida fácilmente, ya que corre el riesgo de dañarse. Este proceso de enriamiento suele requerir un período de entre veintiún y cuarenta y dos días para extraer la fibra del plátano.<sup>39</sup>

La descomposición de la fibra mediante tratamiento biológico se lleva a cabo gracias a la acción de diversos microorganismos, como hongos y bacterias, que tienen la capacidad de degradar la estructura compleja de la pared vegetal mediante la actividad de enzimas específicas como celulasas y enzimas que modifican la lignina. Para mejorar la eficacia de los pretratamientos, se pueden emplear microorganismos con alta capacidad lignocelulolítica, como hongos de la podredumbre blanca, o se pueden utilizar diferentes variantes de consorcios microbianos que logran una degradación más completa de la pared celular vegetal. Se puede mencionar que, estos co-cultivos representan una solución eficiente en la biotransformación de sustratos complejos. Se menciona ampliamente que los géneros *Curvularia* y *Trichoderma* son microorganismos con alta capacidad lignocelulolítica.<sup>40</sup>

La hidrólisis enzimática es un método moderno para obtener nanopartículas de celulosa de manera eficiente en términos de energía. Durante este proceso, se forman nanofibras cristalinas conectadas a una fase amorfa. Generalmente, se emplean pulpas blanqueadas como punto de partida, que luego se tratan con enzimas, principalmente celulasas. A menudo, se combinan técnicas mecánicas para mejorar la accesibilidad de las fibras celulósicas. Durante la hidrólisis enzimática, la estructura de la biomasa cambia a una escala nanométrica, lo que afecta la forma en que las enzimas pueden

acceder y descomponer la celulosa. Esto se debe a que las enzimas continuamente modifican el tamaño y la forma de las fibrillas, así como el área superficial disponible para la reacción.<sup>28</sup>

*1.7.4 Combinación de los métodos.* Los pretratamientos mecánicos, químicos y enzimáticos se usan para mejorar la producción de nanofibras de celulosa (CNF) y reducir el consumo de energía. Dentro de estos métodos se encuentra la homogeneización a elevadas presiones, micro fluidización, molienda y refinado. Estos métodos se pueden aplicar individualmente o en combinación según las necesidades del proceso y las propiedades deseadas del producto final. A pesar de estos pretratamientos, a veces es difícil obtener un producto homogéneo, razón por la cual se opta por la combinación de estos métodos.<sup>41</sup>

Métodos como la hidrólisis ácida presenta alta cristalinidad pero con desecho de grandes cantidades de aguas ácidas, mientras que la desintegración mecánica tiene alta pureza pero alto consumo energético, las bacterias aerobias generan gran pureza y cristalinidad pero bajo rendimiento, y la hidrólisis enzimática es respetuosa con el medio ambiente sin embargo necesita mayor tiempo de preparación, el electro hilado es versátil pero propenso a aglomeración, por otra parte la homogeneización es eficiente pero con desventajas como obstrucción y disminución de estabilidad térmica, la molienda es rápida pero con necesidad de mantenimiento y con el refinado se aumenta superficie pero disminuye longitud y cristalinidad.<sup>28</sup>

Cada método tiene su ventaja es por ello que se los puede combinar y aprovechar de mejor manera lo que cada uno ofrece, para obtener una mejor extracción de celulosa, al utilizar una combinación de tratamientos, se puede optimizar la extracción de celulosa según las características específicas del raquis de banano, logrando así una mayor eficiencia y mejor calidad del producto final.

## **1.8 Caracterización de las nanofibras de celulosa**

*1.8.1 Microscopia electrónica de barrido (MEB).* En el análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB o en sus siglas en ingles SEM) se vale de una corriente de partículas diminutas para examinar la superficie de la muestra. Estas partículas dispersas son colectadas para formar una imagen detallada, que gracias a esta técnica, se pueden explorar tanto la composición química como la estructura material a escalas minúsculas, permitiendo así un entendimiento profundo de la organización interna de una variedad de materiales.<sup>42</sup>

Por otro lado, las propiedades morfológicas de las nanoestructuras de celulosa, tales como las nanofibras de celulosa (NFC), pueden ser observadas a pesar de sus dimensiones y formas irregulares. Estas nanoestructuras pueden tomar diferentes formas, desde placas delgadas hasta fibras individuales, dependiendo del proceso de autoensamblaje durante su formación. Aspectos como la concentración, cristalinidad y cambios en la carga superficial también influyen en su morfología. Por lo tanto, es esencial realizar una observación detallada de estas características para entender mejor sus propiedades y aplicaciones en diversas áreas.<sup>43</sup>

1.8.2 *Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)*. La Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica fundamental para analizar los grupos funcionales, la estructura molecular. Para obtener el espectro de absorción, se utiliza un instrumento llamado espectrofotómetro, que emite un haz de radiación infrarroja que atraviesa la muestra, esta interacción de la radiación infrarroja con los enlaces covalentes presentes en dichos materiales, produce vibraciones moleculares específicas, las mismas que revelan información sobre la composición química y los enlaces presentes en la muestra.<sup>44</sup> Para determinar los grupos funcionales (OH-) en la celulosa se usan intervalos de medición en la escala de absorbancia desde 4000 a 700  $\text{cm}^{-1}$ .<sup>45</sup>

La FTIR tiene una amplia gama de aplicaciones en áreas como la química, la farmacología, la ciencia de materiales y la biología, ya que permite identificar con precisión y rapidez diversos compuestos.

Tabla 1. Principales bandas de los espectros FTIR para las NFC

Longitud de onda		Componentes	Grupo Funcional
3700	3200	OH	Celulosa <sup>46</sup>
3414	3412	OH	Celulosa <sup>46</sup>
2900	2700	C-H	Celulosa- Hemicelulosa <sup>47</sup>
1730	1700	C=O	Ácido Carboxílico <sup>48</sup>
1600	1500	N-C-O	Lignina <sup>49</sup>
1600	1475	C-C	Lignina <sup>48</sup>
1433	1428	C-6	Celulosa <sup>47</sup>

Tabla 2. (Continuación)

Longitud de onda	Componentes	Grupo Funcional	
1336	1000	C6	Celulosa <sup>50</sup>
1317	1317	C-O	Celulosa-Carbonil <sup>49</sup>
1428	1311	CH2	Celulosa <sup>51</sup>
1300	1000	C-O-C	Celulosa <sup>47</sup>
1294	1241	C-O	Lignina <sup>49</sup>
1100	1160	C-O-C	Celulosa <sup>52</sup>
1160	1000	C-O-C	Celulosa <sup>49</sup>
896	894	C-H	Celulosa <sup>50</sup>
588	662	C-OH	Carboxilo <sup>49</sup>
527	521	C-O-C	Celulosa <sup>53</sup>

Fuente: Autoría propia

**1.8.3 Potencial de Carga cero.** El potencial de carga cero (PCC) es fundamental en las teorías de la doble capa eléctrica (EDL), indicando el punto donde la superficie de un material no tiene carga neta. Al alejarse de este punto, se forman contraiones que crean la doble capa eléctrica. Medir el PCC en electrodos metálicos es difícil debido a la preparación de electrodos monocristalinos y la adsorción específica de iones.<sup>54</sup>

El PCC se encuentra graficando  $\text{pH}$  inicial vs  $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH}$  inicial –  $\text{pH}$  final).<sup>55</sup> El  $\text{pH}$  en el potencial de carga cero ( $\text{pH}_{\text{PCC}}$ ) determina el  $\text{pH}$  donde la superficie de un adsorbente es eléctricamente neutra:

- Cuando el  $\text{pH}$  es menor que el  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es positiva.
- Cuando el  $\text{pH}$  es igual al  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es neutra.
- Cuando el  $\text{pH}$  es mayor que el  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es negativa.

Esta variación en la carga superficial influye en la capacidad de adsorción del material. Una carga negativa favorece la adsorción de cationes, mientras que una carga positiva favorece la adsorción de aniones.<sup>56</sup> La carga superficial en fase acuosa se modifica por la adsorción de iones y se estudia con curvas de consumo de protones, convergiendo en el PCC.<sup>57</sup>

## 1.9 Viabilidad Económica

1.9.1 CAPEX. Abreviatura de Capital Expenditure, se refiere a los fondos destinados a adquirir, mejorar o mantener activos físicos a largo plazo, cruciales para la capacidad productiva y la expansión de operaciones. Es esencial disponer de un presupuesto CAPEX preciso al iniciar o mantener un inventario, revisar los gastos operativos (OPEX), y calcular el capital necesario para las necesidades de cada departamento, determinando así el presupuesto anual requerido.<sup>58</sup> Dentro de este presupuesto se incluyen costos tales como, los equipos de procesamiento, el manejo del agua, la infraestructura, el desarrollo y los costos de abandono.<sup>59</sup>

1.9.2 OPEX. Los costos operativos se dividen en variables y fijos. Los costos variables incluyen mano de obra, mantenimiento, combustibles y productos químicos, mientras que los costos fijos abarcan servicios públicos, alquiler de equipamiento, seguros y gastos generales y administrativos. Además, hay otros costos relacionados con transporte y logística, personal y materiales, y otros costos operativos no previamente mencionados. Estos costos se agrupan y se clasifican en fijos o variables según las áreas analizadas y la diversidad de los resultados obtenidos.<sup>59</sup>

Tabla 3. CAPEX OPEX – Costos fijos/variables

Rama	Tipo	Fijo/Variable
CAPEX	Instalaciones	Fijos
	Equipamiento	Fijos/Variables
	Perforaciones	Variables
	Gasoducto/oleoducto	Fijos
	Abandono	Fijos
	Otros CAPEX	Fijos/Variables
	Campos Fijos	Fijo
OPEX	Campos Fijos	Fijos
	Campos Variables	Variables
	Transporte	Variables
	Otros OPEX	Variables
IMPUESTO	Regalías	Variables
	A las ventas	Variables
	A la Renta	Variables
	Otros	Variables

Fuente: Gestión de servicios enfocados a OPEX en lugar de CAPEX<sup>58</sup>

## CAPITULO II

### 2. METODOLOGÍA

#### 2.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo analítico y comparativo, involucra la síntesis de nanofibras de celulosa utilizando métodos físicos, químicos y biológicos, seguido de la caracterización morfológica de las nanofibras de celulosa.

#### 2.2 Diseño de investigación

La investigación tuvo un diseño experimental, donde se desarrolló la manipulación de variables, en el cual se utilizó una combinación de los métodos físicos, químico y biológicos para la determinación de componentes lignocelulósicos. Además, para la caracterización de las NFC se aplicaron las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB), la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (EITF) y  $\text{pH}_{\text{pzc}}$ .

#### 2.3 Enfoque de investigación

Tuvo un enfoque mixto cualitativo – cuantitativo, debido a que se caracterizó y evaluó de la viabilidad económica de los métodos para la obtención de las nanofibras de celulosa.

#### 2.4 Ubicación Geográfica

La parte experimental se realizó en los laboratorios de investigación de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, de la Universidad Técnica de Machala.

#### 2.5 Población de estudio

El recurso vegetal utilizado en la investigación corresponde a los residuos de banano, específicamente el raquis. Mientras que el objeto de estudio la investigación fueron los métodos para obtención de nanofibras de celulosa.

#### 2.6 Variables

Las variables a tratar en la investigación fueron variables dependientes e independientes. Las variables independientes fueron los diferentes métodos de extracción de las nanofibras de celulosa por método biológico físico y químico, y la variable dependiente analizadas fueron nanofibras de celulosa, con esto se evaluó cómo diferentes métodos de extracción influyen en sus características.

## 2.6 Materiales, reactivos y equipos

En el presente estudio, se emplearon múltiples materiales, reactivos y equipos para la extracción y caracterización de nanofibras de celulosa. La tabla a continuación proporciona una descripción detallada de los elementos necesarios para que se lleve a cabo los procedimientos experimentales.

Tabla 4 Descripción de los materiales, reactivos y equipos a utilizar.

Materiales	Reactivos	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> <li>Balón volumétrico de 100ml, 250ml, 500ml, 1000ml</li> <li>Probeta de 100ml</li> <li>Pipeta graduada</li> <li>Varilla de agitación</li> <li>Barras de agitación magnética</li> <li>Frascos para reactivos de 250 ml</li> <li>Embudo</li> <li>Papel filtro</li> <li>Matraz de 250ml y 500ml</li> <li>Fundas con auto cierre</li> <li>Piseta</li> <li>Pinzas</li> <li>Espátula</li> <li>Tamiz malla 250 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>Termómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hidróxido de sodio NaOH pureza 98.8% (Fisher scientific)</li> <li>Peróxido <math>\text{H}_2\text{O}_2</math> 10V</li> <li>Ácido clorhídrico HCl pureza 37.4% (Fisher chemical)</li> <li><i>Trichoderma spp</i> (Equabiológica)</li> <li>Carboximetilcelulosa</li> <li>Sulfato de amonio concentrado <math>(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4</math> (Fisher chemical)</li> <li>Fosfato diádico de potasio concentrado <math>\text{K}_2\text{HPO}_4</math> (Fisher chemical)</li> <li>Ácido cítrico <math>\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7</math></li> <li>Citrato de sodio <math>\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7</math> (Fisher scientific)</li> <li>Agua destilada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Balanza analítica (OHAUS PIONEER)</li> <li>Estufa (MEMMERT VN6400 4051785)</li> <li>Campana de extracción (LABCONCO)</li> <li>Molino de cuchillas</li> <li>pH-metro (OHAUS AQUASEARCHER)</li> <li>Agitador orbital (INFORS HT Celltron)</li> <li>Plancha de calentamiento (CIMAREC SP131015)</li> <li>Reactor hidrotermal con cámara de Teflón</li> <li>Microscopio electrónico de barrido</li> <li>Espectrómetro infrarojo</li> <li>Liofilizador</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

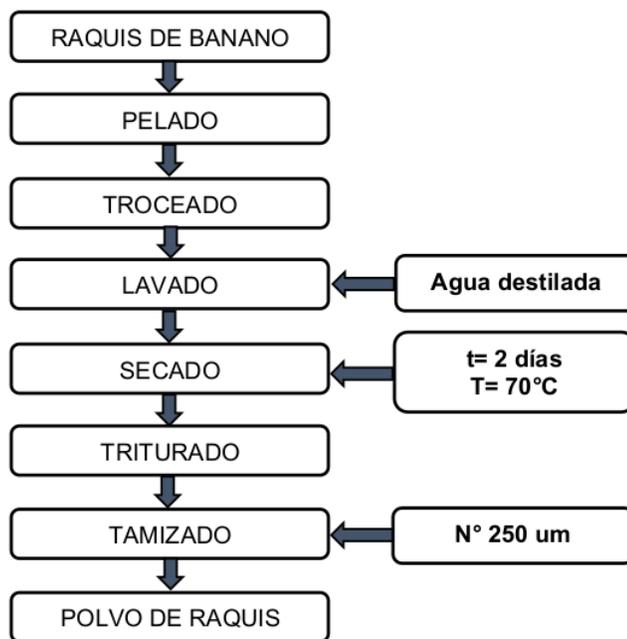
## 2.7 Desarrollo experimental

### 2.7.1 Preparación de la muestra.

Se recolectó la materia prima (raquis de banano), de la Universidad Técnica de Machala, en la facultad de Ciencias Agropecuarias, luego de la recolección realizó el lavado, pelado y troceado (cubitos 1cm aprox) de materia prima se obtuvo 6.91 kg, luego del proceso de troceado se sumerge en agua destilada, para evitar la oxidación, a continuación se realizó un último lavado con agua destilada con el fin de eliminar impurezas presentes en nuestra muestra, seguidamente se secó la muestra con toallas adsorbentes para reducir la humedad y se lo llevó a la estufa a 70°C por 48 horas, pasado este tiempo se consiguió 345.30 g de raquis seco.<sup>60</sup>

Una vez que se obtuvo la muestra seca, se trituro y tamizo con un tamiz de 250um, se obtuvo 304.08 g raquis particulado (polvo). Finalmente se almacenó este raquis particulado en frascos ámbar para prever que la luz afecte sus propiedades y conservar la muestra.

Figura 5. Obtención del polvo del raquis de banano

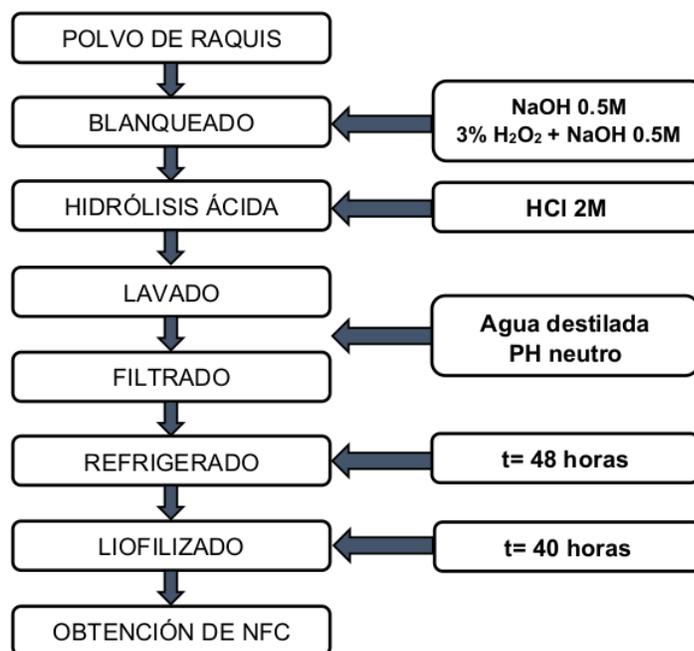


Fuente: Autoría propia

## 2.7.2 Métodos de obtención de nanofibras de celulosa.

2.7.2.1 Método 1 - Tratamiento químico (Q). Se siguió con la metodología establecida, se hizo ciertas modificaciones<sup>61</sup>. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso del método 1 para la obtención de nanofibras por tratamiento químico.

Figura 6. Diagrama de flujo de tratamiento químico



Fuente: Autoría propia

Para comenzar, se pesó 15 gr de polvo de raquis, el cual paso primeramente por el tratamiento alcalino, para esto se preparó una solución de 300ml de 0.5M de NaOH, para ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$\frac{40g NaOH}{1 mol NaOH} * \frac{0.5 mol NaOH}{1 L} * 0.30 L = 6g NaOH$$

En un matraz se sumergió los 15 gr de polvo de raquis con los 300ml de NaOH 0.5M, con ayuda de una plancha de agitación, se colocó la muestra a 30°C por 18h, luego se lavan las muestras, mediante decantación y filtración, este procedimiento se realizó hasta que la muestra alcanzó un pH neutro. Simultáneamente se siguió con el blanqueamiento, el cual consiste en preparar una solución binaria de 200ml con NaOH

0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3% en peso. Se empezó con el cálculo para hacer <sup>53</sup> una solución de 3% <sup>16</sup> peróxido de hidrógeno en un volumen de 200ml, para ello se empleó la ecuación (1)

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (1)$$

Donde:

<sup>16</sup> C<sub>1</sub>: Solución concentrada %

V<sub>1</sub>: Volumen de solución concentrada a diluir L

C<sub>2</sub>: Solución diluida %

V<sub>2</sub>: Volumen de solución diluida L

$$V_1 = \frac{0.30 * 200 \text{ ml}}{0.60} = 100 \text{ ml H}_2\text{O}_2$$

Se tomaron 100 ml de la solución concentrada al 6% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la cual se diluye <sup>51</sup> en un balón volumétrico de 200ml con agua destilada consiguiendo una solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, esta sirvió como solución base para adicionar el NaOH que se calcula a continuación.

$$\frac{40g \text{ NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} * \frac{0.5 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ L}} * 0.20 \text{ L} = 4g \text{ NaOH}$$

Se pesó 4g de NaOH para mezclarlos con la solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, una vez realizada esta solución, se mezcló junto con la muestra en la plancha de agitación magnética a una temperatura de 45°C por un tiempo de 14h. Pasado este tiempo, se realizó el lavado mediante decantación, luego se filtra y se lava nuevamente hasta llegar a un pH neutro.

Posteriormente, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, se preparó una solución de 200 ml ácido clorhídrico (HCl) 2 M a partir de una solución de HCl al 37%, para ello se realizaron los cálculos en los que se emplearon las ecuaciones (2) y (1), como se detalla a continuación:

$$\frac{37 \text{ ml HCl}}{100 \text{ ml de sol. conc.}} * \frac{2500 \text{ ml de sol. conc.}}{1} * \frac{1.19 \text{ g HCl}}{1 \text{ ml HCl}} = 1100.75 \text{ gr HCl}$$

$$M = \text{moles soluto/L solucion} \quad (2)$$

$$M = 12.08 \text{ M}$$

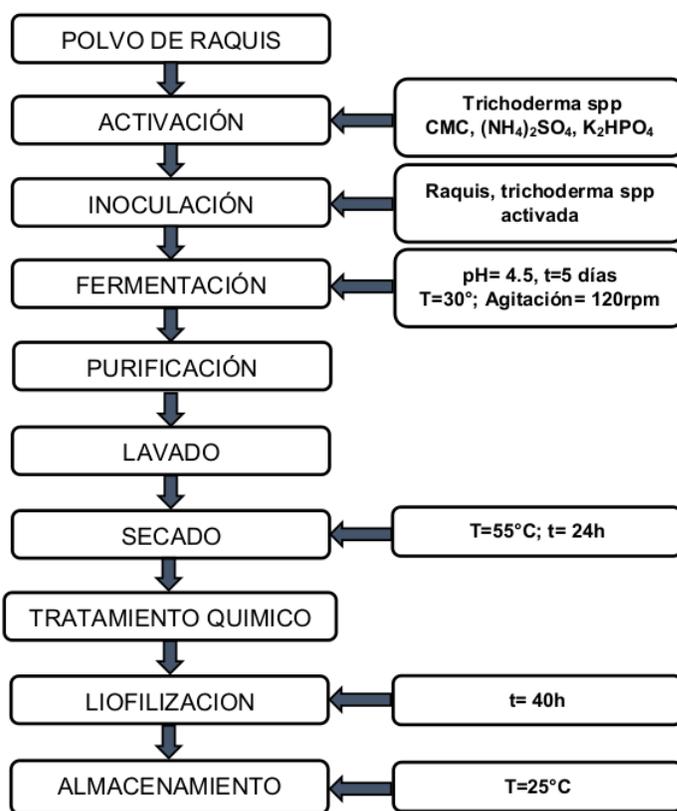
$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (1)$$

$$V_1 = 33.11 \text{ ml}$$

En la solución de HCl 2M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y sometió a agitación en una plancha de agitación y calentamiento a 55°C durante 2 h, pasado este tiempo se lavó la muestra obtenida, primero por decantación y luego por filtración hasta llegar a un pH neutro. Finalmente se colocaron las muestras en frascos con tapa esterilizados y se sometieron a congelación por 24 horas, posteriormente, las muestras fueron liofilizadas por 40h, por último, se almacenó en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

2.7.2.2 *Método 2 - Enriado biológico y tratamiento químico (BQ).* Para este método se realizó el enriado biológico, el cual consta en la activación, incubación del hongo *Trichoderma spp* e inoculación del mismo con la muestra del polvo de raquis, el remanente insoluble obtenido se seca y se lo trata con el método químico, como se muestra en el siguiente diagrama.<sup>62</sup>

Figura 7. Diagrama de flujo para la obtención de nanofibras por enriado biológico y tratamiento químico



Fuente: Autoría propia

Enriado biológico: <sup>15</sup> Se preparó una solución de 250 ml Buffer (citrato de sodio + ácido cítrico), para esto se realizan los cálculos respectivos previamente, con los cuales se preparó las siguientes soluciones:

Solución de 250 ml de citrato de sodio  $Na_3C_6H_5O_7$  a 0.05M

$$\frac{258.06 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } Na_3C_6H_5O_7} * \frac{0.05 \text{ mol } Na_3C_6H_5O_7}{1 \text{ L}} * 0.25 \text{ L} = 3.226 \text{ g } Na_3C_6H_5O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M

$$\frac{192.12 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } C_6H_8O_7} * \frac{0.5 \text{ mol } C_6H_8O_7}{1 \text{ L}} * 0.1 \text{ L} = 9.606 \text{ g } C_6H_8O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico  $C_6H_8O_7$  a 0.75 M

$$\frac{192.12 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } C_6H_8O_7} * \frac{0.75 \text{ mol } C_6H_8O_7}{1 \text{ L}} * 0.1 \text{ L} = 14.409 \text{ g } C_6H_8O_7$$

El volumen total de la solución Buffer es de 250ml, para la preparación del mismo en un balón volumétrico aforado de 250ml, se realizó la solución base de citrato de sodio, para esto se pesó <sup>33</sup> 3.226 g de citrato de sodio y se disolvió en 230 ml de agua destilada con esto se obtuvo una solución con pH de 8.2 aprox. ligeramente alcalino, es por ello que con las soluciones de ácido cítrico se ajustó pH a 4.5, para esto se colocó en buretas las solución de ácido cítrico y se hizo caer gota a gota, mientras estaba en agitación, al mismo tiempo fue tomando el pH. Se debe tener cuidado y no pasarse del aforo de 250 ml, ni del valor del pH, si no se llegase al aforo con el ácido, se adiciona agua destilada y se comprueba que el pH sea el correcto.

Una vez que se preparó la solución BUFFER, se trasvasa a un matraz Erlenmeyer y se pesaron los compuestos de sulfato de amonio y fosfato di ácido de potasio, que aportaron los nutrientes (10% N, 3% S, 5% P) necesarios para la activación del *Trichoderma spp.*, para saber la cantidad necesaria se realizó los respectivos cálculos.

Cálculo de N con  $(NH_4)_2SO_4$

$$\frac{10N}{100} * \frac{132.14g (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} * \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } N} * \frac{1 \text{ mol } N}{28 \text{ g } N} = 0.472 \text{ g } (NH_4)_2SO_4$$

Cálculo de S con  $(NH_4)_2SO_4$

$$\frac{3S}{100} * \frac{132.14g (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} * \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } S} * \frac{1 \text{ mol } S}{32 \text{ g } S} = 0.124 \text{ g } (NH_4)_2SO_4$$

Cálculo de P con  $KH_2(PO_4)$

$$\frac{5P}{100} * \frac{136g KH_2(PO_4)}{1 mol KH_2(PO_4)} * \frac{1 mol KH_2(PO_4)}{1 mol P} * \frac{1 mol P}{31 g P} = 0.219 g KH_2(PO_4)$$

Así mismo se utilizó una solución de carboximetilcelulosa (CMC) de grado alimenticio al 3% para los 250 ml de la solución BUFFER.

$$\% \frac{P}{V} = \frac{g soluto}{ml solucion} * 100 \quad (1)$$

$$g soluto = \frac{3}{100} * 250 = 7.5 g CMC$$

Luego que se realizaron los cálculos, se obtuvo que se necesitó 0.596 g  $(NH_4)_2SO_4$  y 0.219 fosfato di ácido de potasio, para que se exista un medio de cultivo óptimo para la activación del hongo. Estos compuestos se los adicionó a la solución BUFFER, con la ayuda de una plancha de calentamiento y agitación magnética. Una vez que se diluyeron completamente los nutrientes en la solución, se calentó a una temperatura a 50°C. Cuando se llegó a esa temperatura se le añadieron los 7.5 g de CMC y se mezcla hasta que quede totalmente homogénea, se dejó enfriar hasta los 30°C, para poder adicionar el hongo *Trichoderma spp.* Para ello se calculó los gramos del hongo que contiene 5% de conidios.

$$\frac{1 \frac{g}{L} Trichoderma spp}{1L} * \frac{100\% Conidios}{5\% Conidios} = 20g Trichoderma spp$$

Se añadieron 20gr del hongo *Trichoderma spp* para la activación y se agitó para que se mezcle completamente con medio de cultivo. Una vez que se tuvo lista la muestra se sellaron los matraces con gasa y una liga para evitar posible contaminación, y se llevó a la incubadora con una plancha agitadora por 3-5 días a 120 rpm.

*Inoculación con polvo de raquis:* Al pasar los días de la activación del hongo, se procedió a preparar una solución de 750 ml Buffer (0.05 M citrato de sodio + ácido cítrico) con un pH 4.5, siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente.

Solución de 750 ml de citrato de sodio  $Na_3C_6H_5O_7$  a 0.05M

$$\frac{258.06 g/mol}{1 mol Na_3C_6H_5O_7} * \frac{0.05 mol Na_3C_6H_5O_7}{1 L} * 0.75L = 9.667g Na_3C_6H_5O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M

$$\frac{192.12 \frac{g}{mol}}{1 mol C_6H_8O_7} * \frac{0.05 mol C_6H_8O_7}{1 L} * 0.1 L = 9.606g C_6H_8O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> a 1 M

$$\frac{192.12 \frac{g}{mol}}{1 mol C_6H_8O_7} * \frac{1 mol C_6H_8O_7}{1 L} * 0.1 L = 19.212g C_6H_8O_7$$

A la solución Buffer de 750 ml se añadió 50g de polvo de raquis y *Trichoderma spp* activada y se colocó en la plancha de agitación magnética para su homogenización, de esta manera se obtuvo un volumen total de 1000 ml de disolución. Luego de esto se trasvasó la disolución en 3 matraces Erlenmeyer para posteriormente llevarlo a la incubadora a 30°C con una plancha agitadora por 5 días a 120 rpm.

Al finalizar este tiempo se colocó la muestra (raquis inoculado) en un recipiente limpio y esterilizado con agua destilada para comenzar el proceso de lavado por medio de decantaciones hasta que el agua se tomó de un color translúcido, luego de esto dicha solución con el hongo *Trichoderma*, se sometió a alta temperatura (90°C) durante 10 min, para inactivar el hongo, posterior a esto se realizó un segundo lavado por medio de decantación, de igual forma se lo realizó hasta que el agua se tomó de un color translúcido. Finalmente se realizó una filtración quedando, así como resultado un remanente insoluble, el cual se lo llevo a una estufa para secarlo a 55°C por 24h, pasado este tiempo queda como resultado un remanente insoluble seco, listo para ser sometido al tratamiento químico.

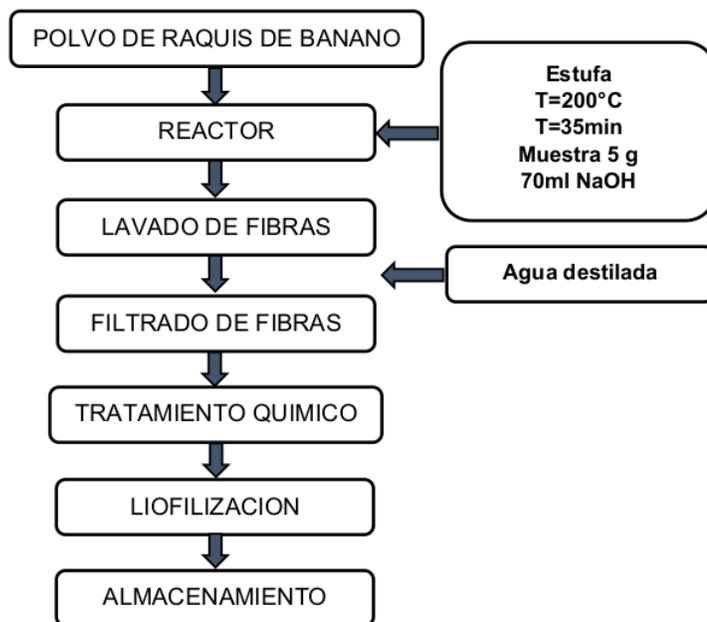
*Tratamiento químico:* Para comenzar con este tratamiento en un matraz Erlenmeyer se colocó 300ml de NaOH al 0.5M y 15 gr del remanente insoluble seco del tratamiento biológico, esto se sometió a agitación a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizaron lavados a la muestra hasta que llegó a un pH neutro.

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se acabó de obtener con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, esta mezcla se la dejó en agitación a 45°C por 14h. Una vez concluido el tiempo, se procedió a realizar el lavado hasta llegar a un pH neutro. A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y sometió a agitación a 80°C durante 2 h. De igual manera se lavó por decantación y filtración hasta que llegó a un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congelaron por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenó en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

2.7.2.3 Método 3 - Explosión de vapor y tratamiento químico (FQ). El procedimiento para realizar el método físico – químico se detalla a continuación:

Figura 8. Diagrama de Explosión de Vapor



Fuente: Autoría propia

Explosión de vapor: Se comenzó pesando 5 gr de polvo de raquis en un vaso de precipitación, a este se le añadieron 70 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 2%, para ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$\% \frac{P}{V} = \frac{g \text{ soluto}}{ml \text{ solucion}} * 100 \quad (3)$$

$$g \text{ soluto} = 5 \text{ g NaOH}$$

Esto se mezcló hasta que se obtuvo una pasta homogénea, luego se trasvasó al recipiente propio del reactor y se cerró para luego llevarlo a la estufa con ventilación a una temperatura de 200°C<sup>38</sup> por 35min.

Una vez concluido este tiempo, se retiró al reactor de la estufa y se abrió la válvula para liberar la presión ejercida en el interior del mismo y se ejecutó la explosión de vapor. El producto de este proceso se encontró con humedad es por ello por lo que se realizaron

los cálculos en base húmeda de la muestra. Asumiendo que la muestra del polvo de raquis tenía contenido de humedad bajo, esta se la despreciaba. Entonces:

$$\text{masa de solido humedo} = \text{masa de humedad} + \text{masa de solido seco} \quad (4)$$

$$\text{masa de humedad} = 70.89 \text{ gr solucion NaOH}$$

$$\text{masa de solido seco} = 5 \text{ gr polvo de raquis}$$

Reemplazando en la ecuación (4).

$$\text{masa de solido humedo} = 75.89 \text{ gr}$$

$$\frac{780 \text{ g masa sólido húmedo}}{5 \text{ g sólido seco}} * \frac{5 \text{ g sólido seco}}{1} = 227.27 \text{ g masa de sólido húmedo}$$

Entonces para tener 15 gr de muestra, necesarios para el siguiente proceso, se necesitó 227.27 gr de masa de solido húmedo que salen del reactor. Para obtener esta cantidad este proceso se realizó 5 veces para continuar con el siguiente método.

Una vez finalizado este proceso los 227.27 gr de muestra, se lavaron mediante decantación, luego se filtró y se lavó nuevamente hasta que llegó a un pH neutro, para luego pasar al siguiente método que es el proceso químico

Tratamiento químico: Para comenzar con este tratamiento en un matraz Erlenmeyer se colocó 300ml de NaOH al 0.5M y la muestra obtenida previamente del tratamiento explosión de vapor, con ayuda de una plancha de agitación y calentamiento, se colocó la muestra a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizaron lavados de la muestra hasta que llegó a pH neutro.<sup>61</sup>

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se acabó de obtener con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, y se la dejó en agitación a 45°C por 14h. Pasado el tiempo, se procedió a realizar el lavado hasta llegar a un pH neutro.

A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl a 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y se sometió a agitación a 80°C durante 2 h. De igual manera se lavó por decantación y filtración hasta que se alcanzó un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congelaron por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenaron en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

#### 2.7.2.4 Método 3 - Enriado biológico, Explosión de vapor y Tratamiento químico (BFQ).

Enriado biológico: Activación de *Trichoderma spp*: Se preparó una solución de 250 ml Buffer (citrato de sodio + ácido cítrico), para esto previamente se preparan las siguientes soluciones:

- 230 ml de citrato de sodio a 0.05M
- 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M
- 100 ml de ácido cítrico a 0.75 M

A la solución de 230 ml Citrato de sodio se le adicionó de gota a gota el ácido cítrico, hasta alcanzar un pH 4.5, teniendo en cuenta no pasar el volumen de 250 ml.<sup>62</sup>

Luego se pesaron los compuestos que aportan los nutrientes (N,S,P) para el crecimiento del hongo: 0.596 g Sulfato de amonio y 0.219 fosfato di ácido de potasio. Y se los adiciona a la solución BUFFER, esto se mezcló con la ayuda de una plancha de calentamiento y agitación magnética. Una vez que se diluyeron completamente los nutrientes en la solución, se calentó la misma a una temperatura a 50°C.

Tan pronto como se haya alcanzado la temperatura de 50°C, se añadió los 7.5 gr CMC en la disolución y se mezcló hasta que quede totalmente homogénea. Dejar enfriar hasta llegar a 30°C, cuando llegue a esa temperatura se procedió a añadir 20gr del hongo *Trichoderma spp*, y se tapan los matraces con gasa para evitar posible contaminación. Luego se lleva a la incubadora con una plancha agitadora por 3-5 días a 120 rpm.

*Inoculación con polvo de raquis:* Al pasar los días de la activación del hongo, se procedió a hacer una solución de 750 ml Buffer con pH 4.5. A esta solución se le añadió los 50g de polvo de raquis y *trichoderma* activada a la solución buffer y homogenizar, de esta manera se obtuvo un volumen total de 1000 ml de disolución.

Luego se trasvasó la disolución en 3 matraces Erlenmeyer, y se los llevó a la incubadora con una plancha agitadora por 5 días a 120 rpm. Al finalizar este tiempo lavar y filtra. Del remanente previamente obtenido por la filtración se pesa 400 g y se sometió a un proceso de secado a 55°C por 24h, luego de este tiempo se obtiene 16 g de remanente seco biológico (RSB), esto se colocó en un recipiente hermético<sup>38</sup>, como resultado queda un remanente insoluble, listo para ser sometido al tratamiento de explosión de vapor.

Explosión de vapor: Siguiendo con el procedimiento para la extracción de la nanofibra por método BFQ, se pesó 5 g de RSB con 70 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 2%.

Una vez lista la muestra, se preparó el reactor hidrotermal, se ingresó la muestra dentro del mismo y se cierra dicho reactor para luego llevarlo a la estufa con ventilación a una temperatura de 200°C por 35min. Una vez concluido este tiempo, se retiró el reactor de la estufa y se abrió la llave de paso del reactor, con esto se liberó la presión ejercida en el interior del mismo y se ejecutó la explosión de vapor.

Una vez finalizadas las extracciones, se pesan 227.27 g de muestra obtenidos el reactor, se lavó la muestra obtenida, mediante decantación, luego se filtró y se lavó nuevamente hasta llegar a un pH neutro para luego pasar al siguiente método que es el proceso químico.

Tratamiento químico: Para continuar con el proceso se realizó el tratamiento alcalino, se preparó una solución de 300ml de NaOH al 0.5M, esta solución se la trasvasa a un matraz Erlenmeyer y se le adicionó a la muestra de la explosión de vapor obtenida previamente, con ayuda de una plancha de agitación, se colocó la muestra a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizó un proceso de lavado, por decantación y filtración hasta que la muestra llegue a pH neutro.<sup>61</sup>

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se obtuvo con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, y se dejó en agitación a 45°C por 14h. Una vez concluido el tiempo, se procedió a realizar el lavado mediante decantación y filtración hasta llegar a un pH neutro.

A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl a 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y somete a agitación en una plancha de agitación y calentamiento a 80°C durante 2 h. De la misma manera se lavó y se decantó hasta que llegue a un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congeló por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenaron en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

Figura 9. Diagrama de Enriado Biológico



Fuente: Autoría propia

## 2.8 Caracterización del material

2.8.1 <sup>23</sup> *Potencial de carga cero (pHpcc)*. Para la determinación del punto de carga cero, se pesó 0.1 g de cada una de las muestras NFC-Q (nanofibras de celulosa por método químico), NFC-BQ (nanofibras de celulosa por método biológico químico), NFC-FQ (nanofibras de celulosa por método físico químico) y NFC-BFQ (nanofibras de celulosa por método biológico físico químico). Simultáneamente se realizó una solución de 300 ml NaCl a 0.01M, con 0.1753 gr de NaCl.<sup>63</sup>

Una vez realizada la solución se trasvasó 50 ml en 6 vasos de precipitación, luego se ajustó el pH con soluciones diluidas de NaOH y HNO<sub>3</sub> en cada uno de los vasos, de modo que tengan diferente valor de pH inicial 2,4,6,8,10,12 respectivamente.<sup>55</sup>

Para finalizar se colocó 25 ml de cada en un tubo falcón de 50 ml con 0.1 g de muestra, al ser 2 repeticiones al final se obtendrán 12 tubos Falcon (2 tubos por cada solución de pH). Esto se lo lleva a la plancha de agitación por 24h a 120 rpm, al concluir este tiempo se volvió a tomar el pH (pH final) a cada uno de los tubos. Este mismo proceso se lo realizó con cada una de las muestras NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ

2.8.2 *Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)*. Para la identificación de los diferentes grupos funcionales asociados a los múltiples componentes de las nanofibras de celulosa NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ, se empleó un espectrofotómetro de los laboratorios de la UTPL, con un rango de frecuencia entre 500 y 4000  $\text{cm}^{-1}$ .<sup>46,47,49-52</sup>

2.8.3 *Microscopía electrónica de barrido (MEB)*. Las micrografías de las nanofibras de celulosa se realizaron en los laboratorios de la ESPE con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido, con las cuales se puede observar la morfología de cada una de las muestras de nanofibras de celulosa de raquis de banano obtenidas por diferentes métodos (NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ)

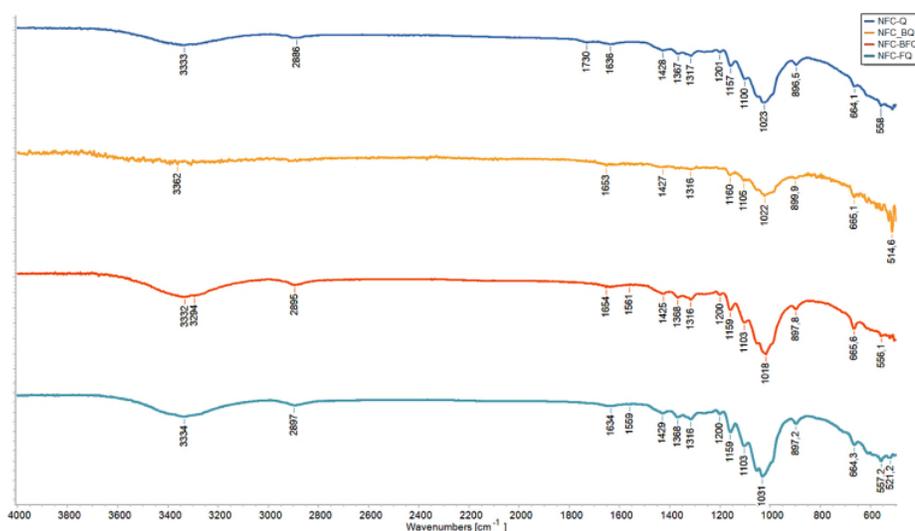
## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de las nanofibras de celulosa

27 3.1.1 *Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)*. Los espectros 42 infrarrojos que se muestran a continuación muestran los diferentes grupos funcionales presentes en las nanofibras de celulosa, que fueron extraídas por 4 métodos (NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ, NFC-BFQ).

Figura 10. Espectro FTIR de nanofibras de celulosa



Fuente: Autoría propia

El raquis de banano, que está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta características distintivas en su espectro de FTIR. En la figura 10, se observan picos desde 3700 hasta 521  $\text{cm}^{-1}$ . Las vibraciones de estiramiento O-H y C-H, ubicadas entre 3700 y 2700  $\text{cm}^{-1}$ , son representativas de la celulosa y hemicelulosa. Específicamente, los picos alrededor de 2900 a 2700  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyen al estiramiento de C-H.<sup>46,47,49,51,52</sup>

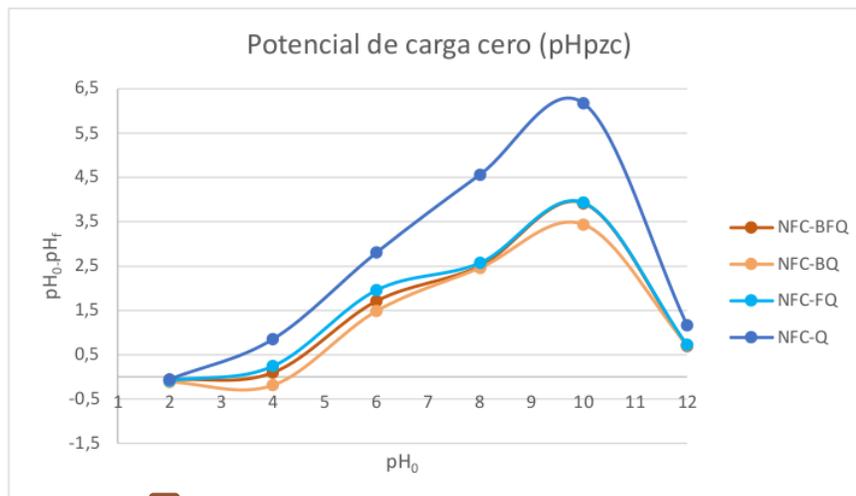
Los picos entre 1730 y 1626  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a las flexiones de los enlaces C=O y C=C, indicando la presencia de ácidos carboxílicos y lignina. La aparición de picos en el rango de 1428 a 1311  $\text{cm}^{-1}$  sugiere la presencia de estiramientos de  $\text{CH}_2$ , característicos de la celulosa. Por su parte los picos que se muestran entre 1294 -1241

$\text{cm}^{-1}$  son estructuras de lignina que se presentan debido al estiramiento del  $\text{C}=\text{O}$ , mientras que los picos en la región de banda  $\sim 1034 \text{ cm}^{-1}$  está asociado a hemicelulosa no hidrolizadas que se encuentra fuertemente unidas a las microfibrillas de celulosa y  $\sim 1021 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de estiramiento  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ , componente de la celulosa. Además, los picos entre  $896, 840$  y  $582 - 521 \text{ cm}^{-1}$  se deben a los estiramientos de  $\text{C}-\text{H}$  y  $\text{C}-\text{OH}$ , confirmando la presencia de celulosa, lignina y grupos carboxilo (celulosa). Estas observaciones en el espectro FTIR reflejan la compleja composición química del raquis de banano.<sup>7,47,49,53,64</sup>

El FTIR NFC-BQ muestra una menor intensidad en el estiramiento dentro del rango de  $1600 \text{ cm}^{-1}$  a  $800 \text{ cm}^{-1}$ , en comparación con los otros métodos que exhiben un mayor estiramiento en este intervalo. Específicamente las NFC-FQ y NFC-Q presentan una mayor intensidad en los picos dentro de este rango, esto sugiere que los otros métodos presentan la mayor concentración de celulosa.

**3.1.2** *Potencial de carga cero (pHpcc)*. Esta prueba se realizó con la finalidad de indicar el punto de carga cero, es decir el punto donde la superficie de un material no tiene carga neta. Debido a que la carga superficial influye en la capacidad de adsorción del material. Además, se comparó los pHpcc para cada una de nanofibras extraídas por diferentes métodos y evidenciar si existen o no diferencias significativas entre los mismos.

Figura 11. Potencial de carga cero de las nanofibras de celulosa como bioadsorbentes



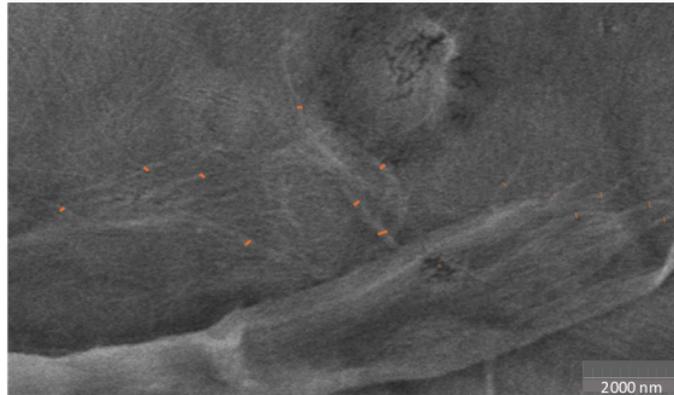
Fuente: Autoría propia

En la figura 11, se observa el comportamiento de las nanofibras de raquis de banano obtenidas por diferentes métodos de extracción, con respecto a las soluciones con distintos valores de pH (2,4,6,8,10,12), puestos en agitación a 120 rpm a 25°C.

El potencial de carga cero en la gráfica se identifica cuando curva intercepta en cero con el eje de la Y, es en este punto es donde se indica que la superficie del material no adsorbe ni desorbe protones. En base en lo mencionado el pH<sub>pcc</sub> para el material NFC-Q fue de 2.125, así mismo para NFC-FQ fue de 3.110, para NFC-BFQ fue de 3.730 y NFC-BQ fue de 4.34. Estos valores indican que si las superficies de las nanofibras de celulosa, trabajan a pH mayores a los valores de pH<sub>pcc</sub> mencionados, la superficie del material estaría cargado negativamente y por ende estaría absorbiendo protones, por el contrario, si trabajan a pH menores, la superficie del material estará cargado positivamente por el aumento de H<sup>+</sup> y por ende atrae aniones.<sup>56,65</sup>

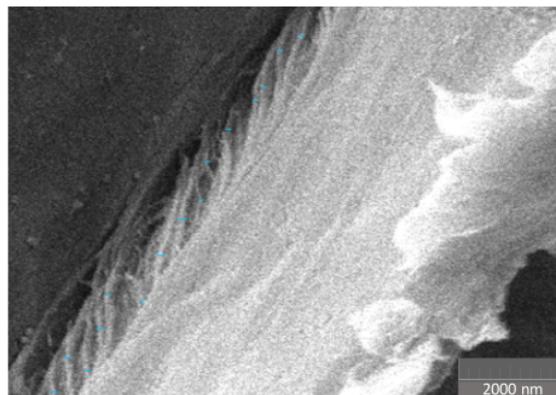
3.1.3 *Microscopía de Barrido (MEB)*. Las nanofibras de celulosa obtenidas por los métodos NFC-Q y NFC-BFQ presentan dimensiones en un rango de 32.99 nm a 96.91 nm y de 35.29 nm a 91.18 nm, respectivamente. Las nanofibras de celulosa obtenidas con el método NFC-Q muestran un menor rango de espesor, así mismo se puede observar que en este método se logran desprender una mayor cantidad de nanofibras y se muestra un campo más limpio. Por su parte, las nanofibras de NFC-FQ tienen un rango de 25.43 nm a 53.95 nm, mientras que las nanofibras de NFC-BQ poseen un rango de 32.18 nm a 53.64 nm. La variabilidad de tamaño indica la efectividad del método de extracción puesto que se aíslan las fibras a escala nanométrica debido a degradación de la lignina y la hemicelulosa, dado como resultado una mayor fibrilación, es decir se producen más nanofibras con menor dimensión.<sup>66,67</sup> Las NFC un gran potencial para aplicaciones industriales y una capacidad de producción adaptable, lo que contribuye a la viabilidad económica de estos procesos. Además, se puede corroborar que son nanofibras, puesto que se consideran así con un rango de 1 a 100nm.<sup>68</sup>

Figura 12. Micrografía SEM de NFC-Q de raquis de banano



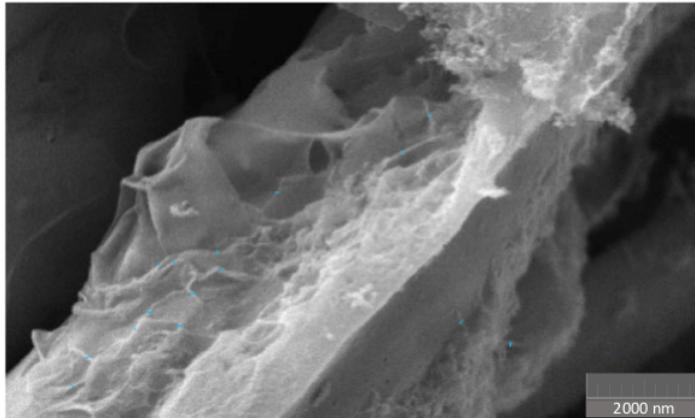
Fuente: Autoría propia

Figura 13. Micrografía SEM de NFC-BFQ de raquis de banano



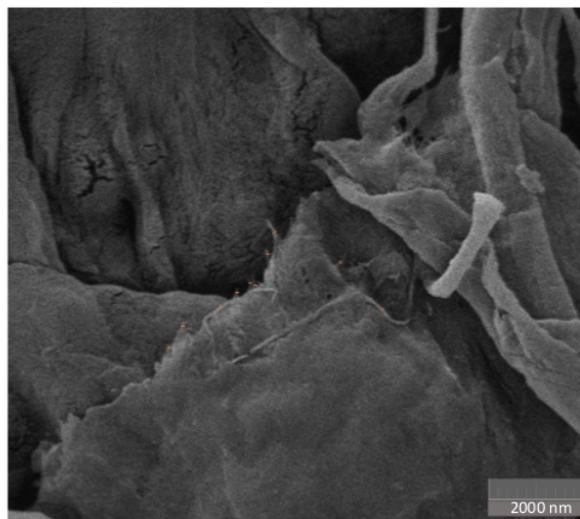
Fuente: Autoría propia

Figura 14. Micrografía SEM de NFC-BQ de raquis de banano



Fuente: Autoría propia

Figura 15. Micrografía SEM de NFC-FQ de raquis de banano



Fuente: Autoría propia

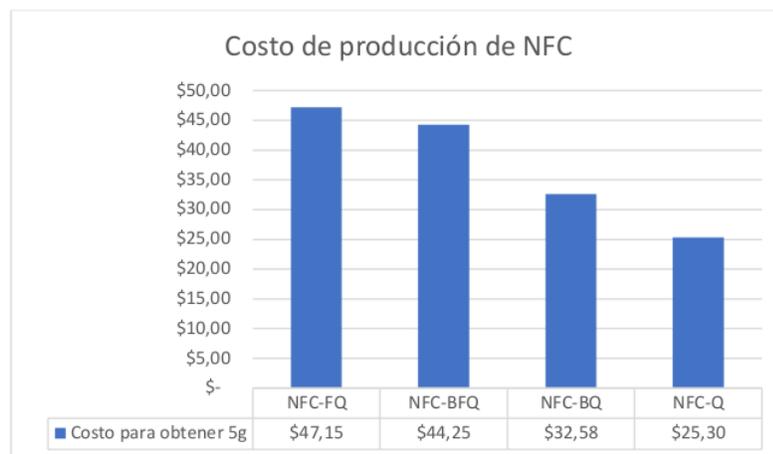
3.1.4 Viabilidad Económica. A continuación, se presenta una evaluación de la viabilidad económica de diferentes métodos para la producción de nanofibras de celulosa (NFC). La tabla 3.1.4 detalla los costos asociados a cada método, incluyendo materia prima, reactivos, consumo energético e insumos, proporcionando una visión general de los gastos totales para cada técnica evaluada.

Cuadro 1. Cuadro comparativo de costos de producción por cada uno de los métodos de extracción.

	NFC-Q	NFC-FQ	NFC-BQ	NFC-BFQ
Material obtenido (g)	3.50	2.65	5.40	5.03
Materia Prima	0.31	0.52	1.04	0.00
Reactivos	3.33	4.46	4.59	6.43
Consumo energético	2.09	2.89	11.52	12.31
Insumos	12.61	18.47	18.98	24.85
TOTAL	18.34	26.35	36.12	44.63

Fuente: Autoría propia

Figura 16. Costos de producción para obtener 5 g de NFC por cada uno de métodos.



Fuente: Autoría propia

En el método químico es el tratamiento base para la obtención de la NFC, es por ello que en todas extracciones se lo realiza, mientras que los métodos biológicos y físicos actúan como pretratamiento para facilitar la despolimerización de la lignina, haciendo que salgan las fibras de celulosa.

El método químico tiene un costo de producción de \$25.30. En comparación, el método biológico-químico tiene un costo adicional de \$7.28, lo que representa un aumento del 28.8%. El método biológico-físico-químico tiene un costo adicional de \$18.95, lo que representa un aumento del 74.9%. El método físico-químico es el más caro, con un costo adicional de \$21.85, lo que representa un aumento del 86.4%.

Estos resultados muestran que el costo de producción aumenta significativamente cuando se incorporan métodos biológicos y/o físicos. Además, las pérdidas en el método físico-químico también contribuyen a su mayor costo.

## CONCLUSIONES

- Los métodos combinados de extracción pueden ofrecer ventajas en términos de pureza y características específicas de las nanofibras; sin embargo, el método químico resultó ser el más viable para la producción de NFC a gran escala debido a su menor costo relativos.
- Los resultados obtenidos por FTIR muestran que las nanofibras a las que se sometieron a un pretratamiento ya sea físico y/o biológico presentaron la menor concentración de lignina (rango de  $1600\text{ cm}^{-1}$  a  $800\text{ cm}^{-1}$ ), lo que indica un mayor grado de pureza. Además, se logra observar que al aplicar un pre tratamiento biológico como en las NFC-BQ y NFC-BFQ, los picos asociados a la lignina son menos prominentes, por lo cual se puede corroborar que la combinación de estos métodos genera una celulosa más limpia y de mejor pureza.
- El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró que las nanofibras de celulosa (NFC) obtenidas por el método biológico-químico (NFC-BQ) presentaron una morfología más uniforme y menos conglomerada, con menor presencia de impurezas, en comparación con las NFC obtenidas por otros métodos. Las NFC del método físico-químico (NFC-FQ) mostraron mayor variabilidad en el diámetro de las fibras. Estas observaciones sugieren que la elección del método de extracción afecta la calidad y uniformidad de las NFC, siendo el método biológico-químico el más efectivo para obtener nanofibras de menor impureza.
- Las nanofibras extraídas por el método biológico-químico (NFC-BQ) con un pH<sub>pcc</sub> mayor son más adecuadas para aplicaciones en medios ácidos, mientras que las obtenidas por el método químico (NFC-Q) con un pH<sub>pcc</sub> más bajo son más efectivas en medios con pH menos ácido, lo que favorece la adsorción de cationes
- Finalmente, los métodos combinados pueden ofrecer ciertas ventajas en términos pureza y uniformidad de las NFC; sin embargo, son más costosos a gran escala. En tanto que, el método químico, aunque produce NFC con menor uniformidad y presencia de algunas impurezas, es significativamente más rentable para la producción a gran escala. Por lo tanto, la elección del método depende de las prioridades entre calidad de las NFC y viabilidad económica.

## RECOMENDACIONES

- Para llevar a cabo la extracción de NFC, combinado con método físico, se recomienda utilizar y/o diseñar un reactor de mayor tamaño, que reducirá las pérdidas de material durante el proceso y hará más eficiente la producción de NFC.
- Se recomienda continuar con la optimización del proceso químico para la obtención de nanofibras de celulosa, enfocándose en la reducción de costos sin comprometer la pureza de las nanofibras.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Peralta Holguin, W. E. Obtención de Nanocristales de Celulosa a Partir de Residuos Agrícolas. Trabajo de titulación, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, **2021**. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14619> (accessed 2024-03-02).
- (2) Borjas Ventura, R.; Julca Otiniano, A.; Alvarado Huamán, L. Las Fitohormonas Una Pieza Clave En El Desarrollo de La Agricultura. *Journal of the Selva Andina Biosphere* **2020**, 8 (2), 150–164.
- (3) Ministerio de agricultura y ganadería. *Panorama Agroestadístico*; **2023**. [http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama\\_estadistico/panorama\\_estadistico.pdf](http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama_estadistico/panorama_estadistico.pdf) (accessed 2024-01-14).
- (4) Macay Anchundia, M. A.; Cedeño Moreira, A. A.; Zambrano Mendoza, M. E.; Intriago Vera, J. V. Uso de Raquis de Plátano (Musa AAB) Para La Producción de Ensilaje Como Estrategia de Economía Circular. *Ciencia Latina Internacional* **2023**, 7 (5), 4848–4862. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i5.8074](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8074).
- (5) Romero Sáez, M. Los Residuos Agroindustriales, Una Oportunidad Para La Economía Circular. *Tecnológicas* **2022**, 25 (54), 1–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.22430/22565337.2505>.
- (6) Caicedo, W.; Viáfara, D.; Pérez, M.; Alves Ferreira, F. N.; Rubio, G.; Yanza, R.; Caicedo, M.; Caicedo, L.; Valle, S.; Ferreira, W. M. Características Químicas Del Ensilado de Raquis de Plátano (Musa Paradisiaca) y Banano Orito (Musa Acuminata AA) Tratado Con Suero de Leche y Urea. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru* **2020**, 31 (4), 1–9.
- (7) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Martins, J. T.; Lanzoni, E. M.; Vicente, A. A.; Menegalli, F. C.; Cunha, R. L. Banana Starch Nanocomposite with Cellulose Nanofibers Isolated from banana Peel by Enzymatic Treatment: In Vitro Cytotoxicity Assessment. *Carbohydr Polym* **2019**, 207, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079>.
- (8) Vallejos, M. E.; Area, M. C. *Producción y Usos de La Celulosa Nanofibrilada Microfibrilada*; Vallejos, M. E., Area, M. C., Eds.; 2019, 2019; Vol. II.
- (9) One Planet Network. *Economía Circular de los residuos orgánicos para la ciudad y el campo*. <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge->

centre/resources/economia-circular-de-los-residuos-organicos-para-la-ciudad-y-el-campo#:~:text=En%20el%20mundo%20se%20generan,a%C3%B1o%20son%20residuos%20org%C3%A1nicos%20biodegradables (accessed 2024-02-28).

- (10) Guerrero, A. B.; Aguado, P. L.; Sánchez, J.; Curt, M. D. GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. *Waste Biomass Valorization* **2016**, *7* (2), 405–415. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9455-3>.
- (11) Moreno Alarcon, B. A.; Zambrano Alvarado, F. D. Evaluación Del Aporte Nutricional de Un Fertilizante Obtenido a Partir de Residuos Orgánicos Para Su Aplicación En Fincas Bananeras., Universidad de Guayaquil, Guayaquil, **2023**. <https://repositorio.ug.edu.ec/items/1eabde1d-04d8-47ec-be26-77c12cbdb0a2> (accessed 2024-02-28).
- (12) Osorio, S.; Guerrero, C. *Aprovechamiento de Cáscara de Banano Para La Producción de Un Textil Aplicado a Productos de Exportación*; **2019**. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/45500/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Aprovechamiento%20de%20c%C3%A1scara%20de%20banano.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed 2024-02-28).
- (13) Bustamante Torres, C. H. Determinación de Los Desechos Orgánicos Que Se Genera En El Proceso de Banano En Las Hcdas. “Italia y Clemencia” de La Frioport S.A En La Zona de Balao El Triunfo, Provincia Del Guayas., Universidad Agraria del Ecuador, GUAYAQUIL, **2015**. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BUSTAMANTE%20TORRES%20CARLOS%20HUGO.pdf> (accessed 2024-02-28).
- (14) Parra Reyes, J. A.; Pérez, E. H. Estimación de Materiales Lignocelulosicos Residuales Como Adsorbentes de Cromo y Plomo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* **2022**, *21* (1), 18–27. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>.
- (15) Santiago, B.; Moreira, M. T.; Feijoo, G.; González-García, S. Environmental Comparison of Banana Waste Valorisation Strategies under a Biorefinery Approach. *Waste Management* **2022**, *142*, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.005>.

- (16) Ahmad Khorairi, A. N. S.; Sofian-Seng, N. S.; Othaman, R.; Abdul Rahman, H.; Mohd Razali, N. S.; Lim, S. J.; Wan Mustapha, W. A. A Review on Agro-Industrial Waste as Cellulose and Nanocellulose Source and Their Potentials in Food Applications. *Food Reviews International* **2023**, *39* (2), 663–688. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478>.
- (17) Vargas Corredor, Y. A.; Pérez Pérez, L. I. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales Para El Mejoramiento de La Calidad Del Ambiente Use of Agro-Industrial. *Facultad de ciencias basicas* **2018**, *14* (1), 59–72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>.
- (18) Agurto Pérez, L.; Barreto Gálvez, L.; Biera Viera, M. Aprovechamiento Agroindustrial de Los Residuos de La Planta de Banano Para La Obtención de Productos Biodegradables En La Provincia de Sullana., Universidad Nacional de Piura, Piura, **2022**.
- (19) Salas V, M. *Reincorporación de residuos Orgánicos de cosecha al Suelo/Mulch*; Costa Rica, **2023**. <https://www.delcampoalplato.com/wp-content/uploads/2023/06/3.-Reincorporacion-de-residuos-organicos-de-cosecha-al-suelo.pdf> (accessed 2024-02-28).
- (20) Reyes Pallazhco, J. M.; Leon Cabrera, P.; Barrezueta Unda, S. Respuesta Del Cultivo de Banano a Diferentes Proporciones de Microorganismos y Biochar En Dos Texturas de Suelo. *Manglar* **2023**, *20* (2), 109–115. <https://doi.org/10.57188/manglar.2023.012>.
- (21) Vera Ruiz, K.; Mexa Aguilar Jorge. Efecto de La Aplicación de Raquis de Banano En La Composición Físquica-Química Del Suelo En Plantación de Banano “Musa Paradisiaca” En La Chanduy, Provincia Santa Elena., **2022**.
- (22) Chugchilan Baraja, G. O.; Zambrano Caisaguano, K. A. Producción de Humus de Lombriz Mediante El Aprovechamiento Del Raquis Del Orito (Musa Acuminata) En El Cantón La Maná Recinto San José Del Estero, Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión la Maná , La Maná, **2021**.
- (23) Jiménez Fallas, M.; Charpentier Alfaro, C.; Méndez Arias, J. *Aprovechamiento de Raquis de Banano Como Fuente de Carbono Para Producción de Celulosas*; **2019**. <https://jornadas.fing.ucr.ac.cr/documentos/Ponencia/2019/Aprovechamiento-de->

raquis-de-banano-como-fuente-de-carbono-para-produccion-de-celulosas.pdf  
(accessed 2024-01-14).

- (24) Suárez Forero, S. J.; Candela Soto, A. M.; Henao Martínez, J. A.; Bayona Ayala, O. L. Evaluación Del Desempeño Del Pretratamiento Con Peróxido de Hidrógeno Sobre Bagazo de Caña de Azúcar Para Remoción de Lignina. *ITECKNE* **2019**, *16* (1), 21–28. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>.
- (25) Zela Ventura, L. Potencial Uso Del Material Lignocelulosico de Tayanca (*Baccharis Microphylla*) Para Obtener Etanol, Abancay-Perú, **2022**. <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1198> (accessed 2024-02-28).
- (26) Jiménez Endara, P. A. Obtención de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina a Partir de Los Residuos de La Planta de Tomate, Mediante Una Metodología Experimental, Para El Desarrollo de Biopelículas., Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, **2023**. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/37070> (accessed 2024-03-02).
- (27) Ouarhim, W.; Zari, N.; Bouhfid, R.; Qaiss, A. E. K. Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*; Elsevier, **2018**; pp 43–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5>.
- (28) 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. Obtención de Nanocelulosa a Partir de Residuos Postcosecha. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología* **2021**, *16* (30), 1–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69662>.
- (29) Mohd Zaini, H.; Saallah, S.; Roslan, J.; Sulaiman, S.; Munsu, E.; Wahab, N. A.; Pindi, W. Banana Biomass Waste: A Prospective Nanocellulose Source and Its Potential Application in Food Industry – A Review. *Heliyon* **2023**, *9*, e18734. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18734>.
- (30) Gorgieva, S.; Trček, J. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications. *Nanomaterials* **2019**, *Vol. 9*, Page 1352 **2019**, *9* (10), 1352. <https://doi.org/10.3390/NANO9101352>.
- (31) Muhammad Awais, N.; Siddiqui, Q.; Mushtaq, M.; Farooq, A.; Pang, Z.; Wei, Q. Insitu Self-Assembly of Bacterial Cellulose on Banana Fibers Extracted from

- Peels. *Journal of Natural Fibers* **2019**, *17* (9), 1–12. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1563580>.
- (32) Espinosa, E. V. *Lignonanofibras de Celulosa (Lnfc) a Partir de Residuos Agro-Industriales No Madereros. Obtención, Caracterización y Aplicaciones.*; Córdoba, **2019**. <https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>.
- (33) Borja Muñoz, B. Síntesis y Caracterización de nanocelulosas de Orígenes Diversos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, **2018**. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/120299?locale-attribute=es> (accessed 2024-03-03).
- (34) Pinto, E.; Aggrey, W. N.; Boakye, P.; Amenuvor, G.; Sokama-Neuyam, Y. A.; Fokuo, M. K.; Karimaie, H.; Sarkodie, K.; Adenutsi, C. D.; Erzuah, S.; Rockson, M. A. D. Cellulose Processing from Biomass and Its Derivatization into Carboxymethylcellulose: A Review. *Scientific African, journal homepage: www.elsevier.com/locate/sciaf* **2022**, *15*, e01078. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2021.E01078>.
- (35) Morales De La Rosa, S. *Hidrólisis Ácida de Celulosa y Biomasa Lignocelulósica Asistida Con Líquidos Iónicos*; Madrid, 2015. <http://hdl.handle.net/10261/132717> (accessed 2024-07-28).
- (36) Galarza Esparza Ricardo Sebastián, M. D. J. I. *Obtención de nanocelulosa mediante la hidrólisis ácida de la cáscara de solanum tuberosum*; Riobamba, **2021**. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15445> (accessed 2024-07-28).
- (37) Sarker, T. R.; Pattnaik, F.; Nanda, S.; Dalai, A. K.; Meda, V.; Naik, S. Hydrothermal Pretreatment Technologies for Lignocellulosic Biomass: A Review of Steam Explosion and Subcritical Water Hydrolysis. *Chemosphere* **2021**, *284*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>.
- (38) Solano Martínez, M. G. Optimización Del Proceso de Hidrólisis Enzimática Parcial (Acellerase ®1500) Para La Obtención de Nanofibras de Celulosa a Partir Del Raquis de Plátano Macho (Musa Paradisiaca L.), Universidad del Papaloapan, Oaxaca, **2018**.
- (39) Solano Martínez, C. E.; María, A.; Amaya, C.; Andrés, E.; Méndez, M.; Andrés, S.; Charles, R.; Zambrano Herreño, E. *Propuesta de Aprovechamiento de Vástago de Plátano Para La Elaboración de Artesanías y Textiles Director*,

Colombia, 2023. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/4e656b17-f18b-465c-946f-6390e7b6de67> (accessed 2024-02-28).

- (40) Vázquez, M. A.; Cabrera, E. C. V.; Torta, L.; Laudicina, A.; Sardina, M. T.; Mirabile, G. Potencialidades Del Consorcio Microbiano *Curvularia Kusanoi* - *Trichoderma Pleuroticola* Como Pretratamiento Biológico Para La Degradación de Fuentes Fibrosas. *Rev MVZ Cordoba* **2022**, *27* (2), 1–11. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2559>.
- (41) González Reyes, A. I. Pretratamiento Químico-Enzimático de Pulpa Kraft de Eucalipto Para La Producción de Nanocelulosa Fosforilada., Universidad de Concepción, Concepción, **2023**.
- (42) Phother-Simon, J.; Hanif, I.; Liske, J.; Jonsson, T. The Influence of a KCl-Rich Environment on the Corrosion Attack of 304 L: 3D FIB/SEM and TEM Investigations. *Corros Sci* **2021**, *183*, 109315. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2021.109315>.
- (43) Alfaro Flores, S. R.; Álvarez Quiroz, M. B.; Asato Cerna, J. E.; González Vásquez, J. A. Nanopartículas de Celulosa: Revisión Sistemática. *Gestión de Operaciones Industriales* **2023**, *2* (02), 8–20. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2023.06>.
- (44) López Sosa, L. B.; Aguilera Mandujano, A.; Morales Máximo, M. *Caracterización Físicoquímica En Recursos Másicos.*; **2023**.
- (45) Presenda-Gerónimo, A.; Bolio-López, G. I.; Azamar- Barrios, V. L.; Ramírez-Casillas, J. A.; Sarracino-Martínez, O.; Hernández-Villegas, M. M.; De la Cruz-Burelo, P. Obtención de Celulosa a Partir de Residuos de Piña (*Ananas Comosus* L. Merrill). *Agro Productividad* **2020**, *13* (2), 77–82. <https://doi.org/10.32854/AGROP.VI.1608>.
- (46) Merais Mohammad Sobri, K. N. S. M. H. M. S. M. B. L. P. C. W. S. Preparation and Characterization of Cellulose Nanofibers from Banana Pseudostem by Acid Hydrolysis: Physico-Chemical and Thermal Properties. *Membranes (Basel)* **2022**, *12* (5). <https://doi.org/10.3390/membranes12050451>.
- (47) García-Ramón, J. A.; Carmona-García, R.; Valera-Zaragoza, M.; Aparicio-Saguilán, A.; Bello-Pérez, L. A.; Aguirre-Cruz, A.; Alvarez-Ramirez, J. Morphological, Barrier, and Mechanical Properties of Banana Starch Films Reinforced with Cellulose Nanoparticles from Plantain Rachis. *Int J Biol Macromol* **2021**, *187*, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>.

- (48) Sumarago, E. C.; dela Cerna, M. F. M.; Leyson, A. K. B.; Tan, N. P. B.; Magsico, K. F. Production and Characterization of Nanocellulose from Maguey (Agave Cantala) Fiber. *Polymers (Basel)* **2024**, *16* (10). <https://doi.org/10.3390/polym16101312>.
- (49) Md Salim, R.; Asik, J.; Sarjadi, M. S. Chemical Functional Groups of Extractives, Cellulose and Lignin Extracted from Native Leucaena Leucocephala Bark. *Wood Sci Technol* **2021**, *55* (2), 295–313. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2>.
- (50) Jiang Fan, C. G. L. Z. A. M. D. X. H. J. J. M. W. L. Y. The HSP/Co-Chaperone Network in Environmental Cold Adaptation of Chilo Suppressalis. *Int J Biol Macromol* **2021**, *187*, 780–788. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.113>.
- (51) Paladini Giuseppe, V. V. C. V. M. D. F. A. P. C. 2D Correlation Spectroscopy (2DCoS) Analysis of Temperature-Dependent FTIR-ATR Spectra in Branched Polyethyleneimine/TEMPO-Oxidized Cellulose Nano-Fiber Xerogels. *Polymers (Basel)* **2021**, *13* (4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/polym13040528>.
- (52) Kumari Priyanka, P. G. G. R. S. D. M. A. Cellulose Nanofibers from Lignocellulosic Biomass of Lemongrass Using Enzymatic Hydrolysis: Characterization and Cytotoxicity Assessment. *DARU, Journal of Pharmaceutical Sciences* **2019**, *27* (2), 683–693. <https://doi.org/10.1007/s40199-019-00303-1>.
- (53) Moosavinejad Seyed Mahdi, M. M. V. M. R. D. Evaluation of Degradation in Chemical Compounds of Wood in Historical Buildings Using Ft-Ir And Ft-Raman Vibrational Spectroscopy. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* **2019**, *21* (3), 381–392. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000310>.
- (54) Le Jiabo, I. M. C. A. C. J. Determining Potentials of Zero Charge of Metal Electrodes versus the Standard Hydrogen Electrode from Density-Functional-Theory-Based Molecular Dynamics. *Phys Rev Lett* **2017**, *119* (1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.016801>.
- (55) Amaringo Villa Fredy Alberto, H. A. A. Determination of the Point of Zero Charge and Isoelectric Point of Two Agricultural Wastes and Their Application in the Removal of Colorants. *Dialnet* **2017**.
- (56) Albis Arrieta Alberto, L. R. H. G. G. J. G. M. D. Adsorción de Azul de Metileno Utilizando Cáscara de Yuca (Manihot Esculenta) Modificada Químicamente Con Ácido Oxálico. *Revista ION* **2019**, *31* (2), 99–110. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018007>.

- (57) Pineda Ayala David Moisés, D. H. J. E. Evaluation of Oil Palm Empty Fruit Bunch Wastes as Adsorbent for the Removal of Reactive Dyes from Aqueous Solutions. *Ingeniería Investigación y Tecnología* **2019**, 20 (1), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.008>.
- (58) Rodríguez Guzmán Daniel Paul. Gestión de Servicios Enfocados a OPEX En Lugar de CAPEX. *Trabajo de Titulación* **2023**.
- (59) Horacio Lazarte A. *Análisis de costos, break-even y perspectivas de la oferta de gas natural en argentina maestría interdisciplinaria en energía*; **2020**.
- (60) Mindiolaza Alvarado Gilbert Joel. *Obtención de Harina de Banano Como Componente En El Desarrollo de Un Suplemento Alimenticio*; Guyaquil, **2020**.
- (61) Zuluaga, R.; Putaux, J. L.; Cruz, J.; Vélez, J.; Mondragon, I.; Gañán, P. Cellulose Microfibrils from Banana Rachis: Effect of Alkaline Treatments on Structural and Morphological Features. *Carbohydr Polym* **2009**, 76 (1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.024>.
- (62) Campos Chacán Stefanía Jazmín, T. Q. A. L. P. A. B. G. S. I. M. *Evaluación de Dos Metodologías de La Extracción de La Fibra Del (Cannabis Sativa L)*; 2022.
- (63) Zein Rahmiana; Akmal Clalitya; Safni Safni; Fauzia Syiffa; Ramadhani Putri. Banana Stem (Musa Balbisiana Colla) as Potential Biosorbent to Remove Methylene Blue Dye in Wastewater: Isotherm, Kinetic, Thermodynamic Studies and Its Application. *Applied Environmental Research* **2023**, 45 (3). <https://doi.org/10.35762/AER.2023015>.
- (64) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Menegalli, F. C. Cellulose Nanofibers Produced from Banana Peel by Chemical and Enzymatic Treatment. *LWT* **2014**, 59 (2P2), 1311–1318. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.011>.
- (65) O Afolabi, F.; Musonge, P.; F Bakare, B. Bio-Sorption of Copper and Lead Ions in Single and Binary Systems onto Banana Peels. *Cogent Eng* **2021**, 8 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1886730>.
- (66) Kumar, R.; Kumari, S.; Surah, S. S.; Rai, B.; Kumar, R.; Sirohi, S.; Kumar, G. A Simple Approach for the Isolation of Cellulose Nanofibers from Banana Fibers. *Mater Res Express* **2019**, 6 (10). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3511>.
- (67) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Martins, J. T.; Vicente, A. A.; Menegalli, F. C. Cellulose Nanofibers Produced from Banana Peel by Chemical and Mechanical Treatments:

Characterization and Cytotoxicity Assessment. *Food Hydrocoll* **2018**, *75*, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.027>.

- (68) Chinga Carrasco Gary. Cellulose Fibres, Nanofibrils and Microfibrils: The Morphological Sequence of MFC Components from a Plant Physiology and Fibre Technology Point of View. *Nanoscale Res Lett* **2011**, *6*, 1–7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417>.

## ANEXOS

### Anexo A. Preparación de la muestra



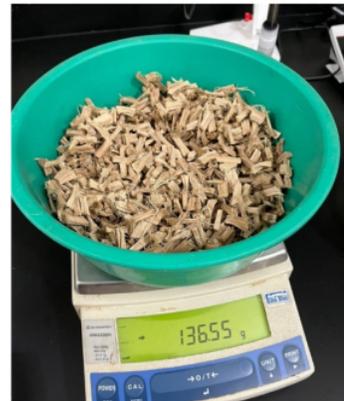
### Anexo B. Pelado del raquis



### Anexo C. Troceado y lavado del raquis de banano



**Anexo D. Secado de raquis**



**Anexo E. Trituración y tamizado del raquis particulado**



**Anexo F. Enriado biológico – inoculación del raquis de banano con *trichoderma spp***



**Anexo G. Explosión de Vapor**



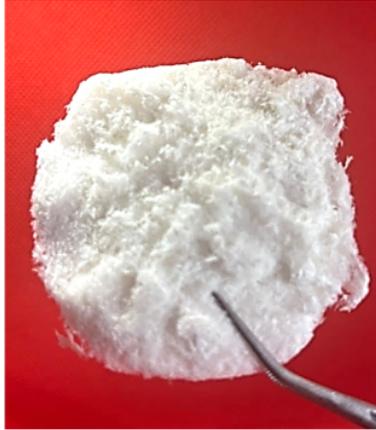
**Anexo H. Tratamiento químico**



**Anexo I. NFC-BQ**



**Anexo J. NFC-BFQ**



**Anexo J. NFC-FQ**



# EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS PURAS A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO.

## INFORME DE ORIGINALIDAD

7 %

INDICE DE SIMILITUD

7 %

FUENTES DE INTERNET

2 %

PUBLICACIONES

1 %

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorio.espe.edu.ec">repositorio.espe.edu.ec</a> Fuente de Internet	1 %
2	<a href="http://www.scielo.org.co">www.scielo.org.co</a> Fuente de Internet	<1 %
3	<a href="http://repositorio.unamba.edu.pe">repositorio.unamba.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
4	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
5	<a href="http://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
6	<a href="http://documentop.com">documentop.com</a> Fuente de Internet	<1 %
7	<a href="http://repository.usta.edu.co">repository.usta.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
8	<a href="http://www.ceare.org">www.ceare.org</a> Fuente de Internet	<1 %

9	<a href="http://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="http://repositorio.ucv.edu.pe">repositorio.ucv.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://repositorio.uptc.edu.co">repositorio.uptc.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://tede.ufam.edu.br">tede.ufam.edu.br</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://upcommons.upc.edu">upcommons.upc.edu</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://dspace.esPOCH.edu.ec">dspace.esPOCH.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Metropolitana de Caracas Trabajo del estudiante	<1 %
17	<a href="http://ddd.uab.cat">ddd.uab.cat</a> Fuente de Internet	<1 %
18	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	<1 %
19	<a href="http://de.slideshare.net">de.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %

20	<a href="http://go.gale.com">go.gale.com</a> Fuente de Internet	<1 %
21	<a href="http://www.flacsoandes.edu.ec">www.flacsoandes.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad EAN Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to Universidad del Atlántico Trabajo del estudiante	<1 %
24	<a href="http://doku.pub">doku.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
25	Submitted to unajma Trabajo del estudiante	<1 %
26	<a href="http://www.revistabionatura.com">www.revistabionatura.com</a> Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	<1 %
28	<a href="http://catalonica.bnc.cat">catalonica.bnc.cat</a> Fuente de Internet	<1 %
29	<a href="http://issuu.com">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1 %
30	<a href="http://repositorio.uwiener.edu.pe">repositorio.uwiener.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
31	<a href="http://repository.unab.edu.co">repository.unab.edu.co</a>	

<1 %

32

C. Antonio-Estrada, L. A. Bello-Pérez, C. E. Martínez-Sánchez, J. L. Montañez-Soto et al. " Producción enzimática de maltodextrinas a partir de almidón de malanga ( ) Enzymatic production of maltodextrins from taro ( ) starch ", CyTA - Journal of Food, 2009

Publicación

<1 %

33

[apirepositorio.unh.edu.pe](http://apirepositorio.unh.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

34

[esnam.eu](http://esnam.eu)

Fuente de Internet

<1 %

35

[trabajoapeyus.blogspot.com](http://trabajoapeyus.blogspot.com)

Fuente de Internet

<1 %

36

[www.buenastareas.com](http://www.buenastareas.com)

Fuente de Internet

<1 %

37

[www.nanoujat.org](http://www.nanoujat.org)

Fuente de Internet

<1 %

38

[helvia.uco.es](http://helvia.uco.es)

Fuente de Internet

<1 %

39

[iberomasacyted.blogs.upv.es](http://iberomasacyted.blogs.upv.es)

Fuente de Internet

<1 %

40

[pesquisa.bvsalud.org](http://pesquisa.bvsalud.org)

Fuente de Internet

<1 %

41	<a href="http://repositorio.uniandes.edu.co">repositorio.uniandes.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
42	<a href="http://repositorioinstitucional.unison.mx">repositorioinstitucional.unison.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
43	<a href="http://repository.javeriana.edu.co">repository.javeriana.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
44	<a href="http://revistas.unitru.edu.pe">revistas.unitru.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
45	<a href="http://revistas.utm.edu.ec">revistas.utm.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
46	<a href="http://ri.uaemex.mx">ri.uaemex.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
47	<a href="http://upc.aws.openrepository.com">upc.aws.openrepository.com</a> Fuente de Internet	<1 %
48	<a href="http://www.elnacional.cat">www.elnacional.cat</a> Fuente de Internet	<1 %
49	Javier García-Andrade Serrano. "Función de OCP3 en la resistencia de Arabidopsis frente a hongos necrotrofos.", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publicación	<1 %
50	Kenly Araya-Chavarría, Ruth Rojas, Karla Ramírez-Amador, Belkis Sulbarán-Rangel, Orlando Rojas, Marianelly Esquivel-Alfaro. "Cellulose Nanofibers as Functional	<1 %

# Biomaterial from Pineapple Stubbles via TEMPO Oxidation and Mechanical Process", Waste and Biomass Valorization, 2021

Publicación

---

51	<a href="http://digi.usac.edu.gt">digi.usac.edu.gt</a> Fuente de Internet	<1 %
52	<a href="http://doaj.org">doaj.org</a> Fuente de Internet	<1 %
53	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
54	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
55	<a href="http://riunet.upv.es">riunet.upv.es</a> Fuente de Internet	<1 %
56	<a href="http://vdocumento.com">vdocumento.com</a> Fuente de Internet	<1 %
57	<a href="http://vsip.info">vsip.info</a> Fuente de Internet	<1 %
58	<a href="http://www.cenal.gov.ve">www.cenal.gov.ve</a> Fuente de Internet	<1 %
59	<a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> Fuente de Internet	<1 %
60	<a href="http://www.teses.usp.br">www.teses.usp.br</a> Fuente de Internet	<1 %

---

61 [zaguan.unizar.es](http://zaguan.unizar.es)

Fuente de Internet

<1 %

62 [eprints.ucm.es](http://eprints.ucm.es)

Fuente de Internet

<1 %

63 Sandra Paola Rojas Lema. "Desarrollo y optimización de nuevas formulaciones de biopolímeros con principios activos para aplicaciones en el sector envase-embalaje", Universitat Politecnica de Valencia, 2022

Publicación

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

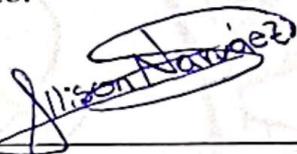
Las que suscriben, NARVAEZ PACHAR ALLISON KARELYS y TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE, en calidad de autoras del siguiente trabajo escrito titulado EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE EXTRACCIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSAS PURAS A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Las autoras declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Las autoras como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



NARVAEZ PACHAR ALLISON KARELYS

0750226409



TOAPANTA GAONA JENNIFER NICOLE

0707050043

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, quienes me incentivaron a ingresar en esta carrera. A mi abuelita, por su constante apoyo y motivación, que han sido fundamentales para alcanzar este logro, a mis hermanos a quienes los amo con todo mi corazón. Un agradecimiento especial a mi novio, quien estuvo conmigo desde primer semestre, este logro también es tuyo, por la fuerza y motivación para culminar la carrera, por creer en mí hasta cuando yo misma dudaba. A mi gatito Simba, quien se encuentra en el cielo, por sus noches de desvelo en este largo proceso y por brindarme todo su cariño. Esta tesis también está dedicada a todos aquellos que han creído en mí y me han impulsado a seguir adelante; cada uno ha dejado una huella imborrable en mi vida.

*Narváez Pachar Allison Karelys*

Con todo mi esfuerzo y amor, dedico este trabajo primeramente a mis padres Hilda Gaona y Cesar Toapanta quienes han sido un pilar fundamental para mí en todo momento, es gracias a ellos que hoy se concreta este logro. A mis hermanos, a quienes quiero con mi corazón, a mi familia, a amigas/os con quienes viví momentos inolvidables e hicieron mi vida universitaria más bonita, a mis ángeles en el cielo que me cuidan y me muestra un camino de luz en momentos de oscuridad, a mi querido Doki que siempre me acompañó y a todas las personas que estuvieron para mí en todo momento apoyándome y deseándome lo mejor.

*Toapanta Gaona Jennifer Nicole*

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profunda gratitud a Dios por mantenerme con salud y rodeado de mis seres queridos. A mis padres, Álvaro Narváez y Margarita Pachar, por ser mi mayor ejemplo y enseñarme a luchar por mis sueños. A mi abuelita, Elvira Orellana, por brindarme su sabiduría y enseñarme a valorar cada aspecto de mi vida. A mi novio, Walter Peña, por su amor incondicional y por ser mi motor a lo largo de mi carrera, y enseñarme que soy capaz de lograr todo lo que me proponga, motivándome así a ser mejor cada día.

Agradezco especialmente a mi tutora, Ing. María Elena Yáñez, y mi Co-tutor Dr. Byron Lapo, por su paciencia y dedicación durante nuestro trabajo de titulación. También extiendo mi agradecimiento a todos los docentes que contribuyeron a este logro, especialmente aquellos que forjaron mis conocimientos desde el primer semestre, y a mis amigas Doménica Gómez, Allison Chica, Evelyn Morocho y Jennifer Toapanta, por su sincera amistad desde primer semestre, su apoyo incondicional durante este proceso y por ayudarme a no rendirme en el transcurso de este largo camino. Gracias a todos, sin ustedes no hubiera sido posible este logro.

*Narváez Pachar Allison Karelys*

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud y guiarme en este proceso. De la misma manera expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres Hilda Gaona y Cesar Toapanta, por su amor y apoyo incondicional, por enseñarme a seguir mis sueños y hacer posible este logro. Agradezco a mis hermanos, por creer en mí, por sus palabras de aliento y por su apoyo constante, a mis abuelitos por su cariño y por estar conmigo incluso si no los puedo ver.

Agradezco a mi tutora Ing. María Elena Yáñez y a mi co-tutor Dr. Byron Lapo, quienes nos han guiado de la mejor manera en este proceso de titulación, también agradezco a todos mis docentes quienes han sido parte de mi formación académica y mostraron que en la universidad podemos encontrar a profesionales con calidez humana. Finalmente, a mis amigas Allison Narváez, Allison Chica y Evelyn Morocho quienes estuvieron conmigo a lo largo de mi vida universitaria, apoyándome y ayudándome cuando lo necesite, demostrando que las verdaderas amistades perduran a lo largo del tiempo. A todos ustedes, les debo este logro y mi más sincero agradecimiento.

*Toapanta Gaona Jennifer Nicole*

## RESUMEN

El desarrollo de materiales a partir de residuos es una alternativa sostenible para reducir la contaminación, debido a que aprovechan estos desechos dándoles un nuevo uso. El presente trabajo de investigación se enfoca en la evaluación de los diferentes métodos de extracción para la obtención de nanofibras de celulosa puras a partir del raquis de banano, para ello se aplicaron los métodos de extracción biológicos, físicos y químicos.

En el método químico, se realizó tratamiento alcalino con NaOH, seguido de un blanqueamiento con NaOH+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y finalmente se hizo una hidrólisis ácida con HCl. En el método biológico, se empleó el hongo *Trichoderma spp* para inocular el raquis de banano; en el tratamiento físico se empleó el uso de un reactor hidrotermal, sumergiendo así el raquis de banano junto con NaOH.

Las nanofibras de celulosa obtenidas se clasificaron de la siguiente manera: NFC-BFQ (combinación de métodos: enriado biológico, explosión de vapor y tratamiento químico), NFC-FQ (aplicación de métodos: explosión de vapor y tratamiento químico), NFC-BQ (unión de métodos: enriado biológico y tratamiento químico) y NFC- Q (por tratamiento químico), estos métodos se combinaron para evaluar su efectividad y caracterizarlas.

La caracterización se realizó mediante la determinación del potencial de carga cero pH<sub>PCC</sub>, espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (EITF) para la identificar grupos funcionales presentes en las NFC, Microscopia electrónica de barrido (MEB) para determinar la morfología de las NFC y análisis de la viabilidad económica.

Según los espectros EITF, el método NFC-BQ muestra el menor estiramiento en el rango de 1600 cm<sup>-1</sup> a 800 cm<sup>-1</sup>, en comparación con los otros métodos. Esto sugiere que el método NFC-BQ tiene la menor concentración de celulosa y lignina, ya que los picos asociados a estos componentes son menos prominentes en este espectro.

Las nanofibras extraídas por el método NFC-BQ, con un pH<sub>pcc</sub> mayor en referencia a los otros NFC, estas serán adecuadas para aplicaciones en medios ácidos, mientras que las obtenidas por el método NFC-Q, con un pH<sub>pcc</sub> más bajo, serán más efectivas en medios con ph más ácidos, debido a que favorece la adsorción de cationes.

Aunque los métodos combinados pueden ofrecer ventajas en términos de pureza y características específicas de las nanofibras, el método químico sigue siendo el más rentable para la producción de NFC a gran escala.

**Palabras claves:** Raquis de banano, Nanofibras de celulosa, métodos de extracción, caracterización, celulosa, EITF, MEB, pH<sub>PCC</sub>

## ABSTRACT

The development of materials from waste is a sustainable alternative to reduce pollution, because they take advantage of this waste by giving it a new use. The present research work focuses on the evaluation of the different extraction methods to obtain pure cellulose nanofibers from the banana rachis, from which biological, physical and chemical extraction methods were applied.

In the chemical method, alkaline treatment with NaOH was performed, followed by bleaching with NaOH+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and finally acid hydrolysis with HCl. In the biological method, the fungus *Trichoderma* spp was used to inoculate the banana rachis; in the physical treatment in he employed the use of a hydrothermal reactor, thus submerging the banana rachis together with NaOH.

In the biological method, the fungus *Trichoderma* spp was used to inoculate the banana rachis; in the physical treatment in he employed the use of a hydrothermal reactor, thus submerging the banana rachis together with NaOH.

The cellulose nanofibers obtained were classified as follows: NCF-BFQ (combination of methods: biological retting, steam explosion and chemical treatment), NCF-FQ (application of methods: steam explosion and chemical treatment), NCF-BQ (union of methods: biological retting and chemical treatment) and NCF-Q (by chemical treatment), these methods were combined to evaluate their effectiveness and characterize them.

The characterization was carried out by determining the zero-charge potential pH<sub>pcc</sub>, Fourier transform infrared spectrophotometry (FTIR) for the identification of the functional groups present in NCFs, Scanning Electron Microscopy (SEM) to determine the morphology of NFCs and analysis of economic feasibility (production costs).

According to FTIR spectra, the NFC-BQ method shows the lowest stretch in the range of 1600 cm<sup>-1</sup> to 800 cm<sup>-1</sup>, compared to the other methods. This suggest that the NCF-BQ method has the lowest concentration of cellulose and lignin, as peaks associated with these componentes are less prominent in the spectrum.

Although combined methods can offer advantages in terms of purity and specific characteristics of nanofibers, the chemical method remains the most cost-effective for large-scale NFC production.

Keywords: Banana rachis, Cellulose nanofibers, extraction methods, characterization, cellulose, FTIR, SEM, pH<sub>pcc</sub>.

## CONTENIDO

	pág.
OBJETIVOS	13
OBJETIVO GENERAL:	13
OBJETIVO ESPECIFICO:	13
CAPITULO I	14
1. MARCO TEORICO	14
1.1 Antecedentes	14
1.2 Residuos agrícolas	15
1.3 Residuos agrícolas de la industria bananera	15
1.3.1 <i>Contaminación ambiental por residuos de banano.</i>	16
1.4 Descripción de la planta de banano	16
1.4.1 <i>Raquis de banano.</i>	16
1.5 Materia lignocelulósica	16
1.5.1 <i>Componentes de la materia lignocelulósica</i>	17
1.5.1.1 <i>Celulosa.</i>	17
1.5.1.2 <i>Lignina.</i>	18
1.5.1.3 <i>Hemicelulosa.</i>	19
1.6 Nanocelulosa	19
1.6.1 <i>Celulosa bacteriana.</i>	20
1.6.2 <i>Nanocristales de celulosa.</i>	20
1.6.3 <i>Nanofibras de celulosa.</i>	20
1.6.3.1 <i>Propiedades.</i>	21
1.6.3.2 <i>Aplicaciones industriales.</i>	21
1.7 Métodos de extracción	22
1.7.1 <i>Métodos químicos.</i>	22
1.7.1.1 <i>Tratamiento alcalino.</i>	22
1.7.1.2 <i>Blanqueamiento.</i>	23

1.7.1.3 <i>Hidrólisis ácida.</i>	23
1.7.2 <i>Métodos físicos.</i>	23
1.7.2.1 <i>Explosión de vapor.</i>	23
1.7.3 <i>Métodos biológicos.</i>	24
1.7.3.1 <i>Enriado biológico al aire libre.</i>	24
1.7.4 <i>Combinación de los métodos.</i>	25
1.8 <i>Caracterización de las nanofibras de celulosa</i>	25
1.8.1 <i>Microscopía electrónica de barrido (MEB).</i>	25
1.8.2 <i>Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).</i>	26
1.8.3 <i>Potencial de Carga cero.</i>	27
1.9 <i>Viabilidad Económica</i>	28
1.9.1 <i>CAPEX.</i>	28
1.9.2 <i>OPEX.</i>	28
CAPITULO II	29
2. METODOLOGÍA	29
2.1 Tipo de investigación	29
2.2 Diseño de investigación	29
2.3 Enfoque de investigación	29
2.4 Ubicación Geográfica	29
2.5 Población de estudio	29
2.6 Materiales, reactivos y equipos	30
2.7 Desarrollo experimental	31
2.7.1 <i>Preparación de la muestra.</i>	31
2.7.2 <i>Métodos de obtención de nanofibras de celulosa.</i>	32
2.7.2.1 <i>Método 1 - Tratamiento químico (Q).</i>	32
2.7.2.2 <i>Método 2 - Enriado biológico y tratamiento químico (BQ).</i>	34
2.7.2.3 <i>Método 3 - Explosión de vapor y tratamiento químico (FQ).</i>	38
2.7.2.4 <i>Método 3 - Enriado biológico, Explosión de vapor, Tratamiento químico (BFQ).</i>	40
2.8 <i>Caracterización del material</i>	42

2.8.1 <i>Potencial de carga cero (pHpcc).</i>	42
2.8.2 <i>Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).</i>	43
2.8.3 <i>Microscopía electrónica de barrido (MEB).</i>	43
CAPITULO III	44
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
3.1 Caracterización de las nanofibras de celulosa	44
3.1.1 <i>Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).</i>	44
3.1.2 <i>Potencial de carga cero (pHpcc).</i>	45
3.1.3 <i>Microscopía de Barrido (MEB).</i>	46
3.1.4 <i>Viabilidad Económica.</i>	49
ANEXOS	62

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales bandas de los espectros FTIR para las NFC	26
Tabla 2. CAPEX OPEX – Costos fijos/variables	28
Tabla 3 Descripción de los materiales, reactivos y equipos a utilizar.	30

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Componentes del material lignocelulósico	17
Figura 2 Estructura de cadena de celulosa	18
Figura 3 Estructura de cadena de lignina	18
Figura 4 Estructura de cadena de hemicelulosa	19
Figura 5. Obtención del polvo del raquis de banano	31
Figura 6. Diagrama de flujo de tratamiento químico	32
Figura 7. Diagrama de flujo para la obtención de nanofibras por enriado biológico y tratamiento químico	34
Figura 8. Diagrama de Explosión de Vapor	38
Figura 9. Diagrama de Enriado Biológico	42
Figura 10. Espectro FTIR de nanofibras de celulosa	44
Figura 11. Potencial de carga cero de las nanofibras de celulosa como bioadsorbentes	45
Figura 12. Micrografía SEM de NFC-Q de raquis de banano	47
Figura 13. Micrografía SEM de NFC-BFQ de raquis de banano	47
Figura 14. Micrografía SEM de NFC-BQ de raquis de banano	48
Figura 15. Micrografía SEM de NFC-FQ de raquis de banano	48
Figura 16. Costos de producción para obtener 5 g de NFC por cada uno de métodos.	49

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la ciencia ha evolucionado centrándose en el aprovechamiento de residuos agrícolas, con el fin de revertir la contaminación ambiental y mejorar la disposición de los desechos agroindustriales.<sup>1</sup>

La actividad agrícola desempeña un papel fundamental en los países subdesarrollados que se dedican principalmente en la producción y exportación de alimentos, siendo el banano uno de estos productos.<sup>2</sup> En la actualidad, Ecuador es considerado como uno de los principales exportadores de banano del mundo. No obstante, el crecimiento de esta actividad ha dado lugar a un incremento significativo de residuos, según el Banco Central del Ecuador (2019).<sup>3</sup>

Los desechos de este monocultivo ocasionan contaminación ambiental, ya sea por su quema o inadecuada disposición, dado que el proceso de postcosecha aprovecha solo entre el 20% y el 30% de la biomasa, dejando sin utilizar aproximadamente el 70% y 80%, lo que propicia la proliferación de plagas y degradación del ecosistema.<sup>4</sup> Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), en el año 2023, se han producido 6.07 millones de toneladas de banano;<sup>5</sup> sin embargo, debido a la gran cantidad de fruta que se produce en el territorio, se genera una elevada concentración de residuos. En Ecuador, el inadecuado manejo de los residuos naturales ha llevado a una mala disposición de estos, dando como resultado una fuente elevada de contaminación.<sup>6</sup>

El raquis, el tallo que sostiene los frutos, constituye uno de estos residuos generados por la Industria Bananera; por su contenido rico en celulosa se impulsa a la búsqueda de alternativas para su aprovechamiento, dado que presenta la posibilidad de utilizarlas como materia prima en la fabricación de diversos productos.<sup>1,7</sup> Es por ello que ofrece una oportunidad para la extracción de nanofibras de celulosa las mismas que tienen un alto impacto en diversas industrias, debido a que presentan propiedades como alta resistencia, rigidez, bajo costo de materia prima, y biodegradabilidad, cualidades que las hacen versátiles en diversas aplicaciones industriales.<sup>1,8</sup>

La extracción de las nanofibras de celulosa se realiza por diferentes métodos, como el método biológico donde se lleva a cabo el enriado biológico en el cual por la ayuda del hongo *Trichoderma (spp)* se hidroliza los componentes de materia lignocelulósica; por otro lado, en el método físico se realiza la explosión de vapor mediante el uso de un reactor hidrotermal donde se somete la muestra a condiciones de presión y altas temperaturas, lo que permite que exista una desfibrilación de las fibras lignocelulósicas. Adicional a estos en el método químico, se aplican una serie de tratamientos químicos

con NaOH, HCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, lo que posibilita la hidrólisis de la celulosa y degradación de los componentes no celulósicos. En la práctica se realiza una combinación de métodos, debido a que el método biológico y el método físico actuarán como un pretratamiento de la biomasa, luego de esto se someterá al método químico, con la finalidad de comparar si existen diferencias significativas en la calidad del producto al aplicar los métodos de pretratamiento mencionado previamente.

Por esta razón, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar los diferentes métodos de extracción (físico, químico y biológico) para la obtención de nanofibras de celulosa, a partir del raquis del banano, además, al conocer su composición química, estructura morfológica y sus propiedades físicas, se realizará la caracterización de las nanofibras de celulosa empleando diferentes técnicas para apreciar sus posibles diferencias en cuanto al producto que se obtenga por cada uno de los diferentes métodos de extracción, con esto podemos identificar los métodos más eficientes para su extracción y maximizar su rendimientos.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar los diferentes métodos de extracción para la obtención de nanofibras de celulosas más puras a partir del raquis de banano.

### **OBJETIVO ESPECIFICO:**

- Extraer nanofibras de celulosa del raquis de banano mediante métodos físicos, químicos y biológicos.
- Caracterizar las nanofibras de celulosa obtenidas mediante distintos métodos de extracción.
- Evaluar la viabilidad económica de los métodos de extracción.

## CAPITULO I

### 1. MARCO TEORICO

#### 1.1 Antecedentes

A nivel mundial por cada año se producen cerca de 2000 millones toneladas de residuos de los cuales el 50% son residuos orgánicos.<sup>9</sup> Estos residuos se generan por la actividad agrícola, hogares y por diferentes procesos industriales.

Dentro de las actividades agrícolas se encuentra la producción de banano que durante el transcurso del tiempo ha aumentado a nivel mundial, siendo uno de los cultivos más importantes alrededor del mundo. Ecuador es uno de los principales países exportadores de banano en el mundo, siendo así que el 29% de la oferta de este fruto proviene de este país. El banano que crece en racimos y su planta produce frutos una sola vez en su vida, que por su naturaleza a nivel nacional se lo cultiva primordialmente en la zona costera, ya que es un cultivo de clima tropical.<sup>10</sup>

Durante los últimos 5 años a nivel nacional se ha tenido ciertas fluctuaciones en cuanto a la cantidad de la producción de este monocultivo, por ejemplo, en el 2018 tuvo una producción nacional de 6.5 millones de toneladas, mientras que en el 2023 decreció a 6.07 millones de toneladas, esto debido a que la demanda que se vio afectada por factores como la pandemia de COVID 19 y enfrentamientos geopolíticos internacionales entre los países consumidores de este fruto.<sup>11</sup> A pesar de esto se mantiene una gran producción a nivel nacional de este monocultivo, debido a la gran cantidad de banano que se produce, genera una elevada cantidad de residuos.

La cosecha produce residuos lignocelulósicos al cortar la planta, como hojas, raquis, tallo, y la proporción que existe entre residuos y banano es de 2:1. Los residuos agrícolas orgánicos provenientes de esta industria, en su mayoría son sólidos, que se pueden degradar o descomponer, ya sea en el suelo o en vertederos a cielo abierto.<sup>10,12</sup> Sin embargo, debido a la falta de conocimiento en cuanto a la correcta gestión de desechos y la falta de un buen control de los mismos, ocasiona un problema de contaminación ambiental, como la generación de gases de efecto invernadero, malos olores y proliferación de plagas.<sup>13</sup>

Estos desechos se pueden aprovechar para la generación de energía, la creación de bioetanol o biogás, además debido a su contenido de material lignocelulósico, el cual sirve como materia prima obtención de celulosa, que a su vez sirve para la obtención de

nanofibras de celulosa, estas se componen de pequeñas fibras en forma de hilos, largas y flexibles.<sup>13</sup>

Las nanofibras tienen una gran acogida en la actualidad por los múltiples usos que se le pueden dar a la misma, por su versatilidad, eficiencia y bajo costo, estos materiales se pueden utilizar como mejorador de propiedades mecánicas y material de refuerzo en las mezclas de cemento, en la industria alimentaria para empaques, así como posibles remediadores ambientales para ayudar en la descontaminación de aguas como absorbentes de metales pesados, además, entre otras.<sup>14</sup> Contribuyendo así a la reducción de la contaminación ambiental, puesto que se transforma un desecho en un nuevo producto con valor agregador y que no es dañino para el medio ambiente.

## **1.2 Residuos agrícolas**

La actividad agrícola genera una cantidad significativa de residuos proveniente de las diferentes etapas del proceso de producción, que al momento de desecharlos no poseen valor agregado, tales como: hojas, tallos, semillas, raíces, cascaras, entre otros,<sup>5,7</sup> estos residuos al ser materiales lignocelulósicos contienen celulosa (40-50%), lignina (15–20%) y hemicelulosa de (25–35%), dependiendo del origen y la genética de la planta, estos valores pueden variar.<sup>15</sup>

La celulosa que se está contenida en los residuos agrícolas se puede recuperar, produciendo así un subproducto de mayor valor y que se puede utilizar como base para diferentes procesos industriales, convirtiéndose en recursos potencialmente valiosos para la economía circular.<sup>5,7</sup> Lo cual al mismo tiempo ayuda a mitigar la contaminación ambiental provocada por la incorrecta gestión de los desechos.<sup>16</sup>

## **1.3 Residuos agrícolas de la industria bananera**

Los desechos de banano se generan a lo largo del tiempo de vida productiva de la planta, en distintas etapas del proceso de producción.<sup>17</sup> Durante la etapa de cosecha y postcosecha se producen desechos como: pseudotallo, hojas, raquis y los frutos denominados descarte que son los bananos que no cumple con las especificaciones para la exportación.<sup>13</sup>

De acuerdo con Fernández, Marangoni, Souza y Sellin, por cada tonelada de bananos producidos se generan alrededor de 100 kilogramos de desechos frutales y cerca de 4 toneladas de desechos lignocelulósicos, entre los cuales se produce aproximadamente: 2920 kg pseudotallos (73%), 480 kg hojas (12%) y 150 kg raquis (3.75%).<sup>18</sup>

*1.3.1 Contaminación ambiental por residuos de banano.* El sector bananero es un generador potencial de residuos vegetales durante el proceso de cosecha, dado que no consume todas las partes de la planta, quedando así una gran cantidad del mismo sin un uso, como los tallos, hojas y raquis, de manera que al incrementar en la producción del cultivo, se aumenta la generación de desecho y por la ejecución inadecuada de estos residuos pueden desencadenar problemas de contaminación ambiental,<sup>19</sup> debido a que por su mala disposición, se produce la descomposición masiva de los mismos, con la quema de los desechos se ocasiona el surgimiento de gases de efecto invernadero, así como enfermedades que impactan en la salud humana y a la fauna. En este sentido, el correcto manejo de desechos orgánicos está ganando importancia día a día.<sup>11</sup>

#### **1.4 Descripción de la planta de banano**

El banano es una de las frutas más consumidas a nivel mundial, por su característico sabor y aroma, además de minerales esenciales como K, Ca, P.<sup>20</sup> Este monocultivo se da en zonas de clima tropical y subtropical, proveniente de la familia de las musáceas. Es una planta herbácea megafobia perenne, lo que quiere decir que esta planta no cuenta con un tallo leñoso, puede crecer entre 3.5 a 7.5 metros, y tiene largos periodos de vida no obstante solo produce fruto una vez a largo de su vida productiva.<sup>18,21</sup>

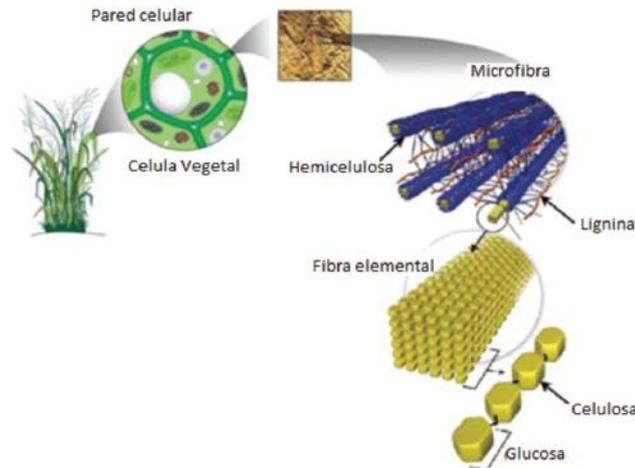
*1.4.1 Raquis de banano.* El raquis también conocido como pinzote o vástago, es la parte que sostiene los frutos. Morfológicamente el raquis en su exterior exhibe una corteza verde delgada y uniforme, de unos 2.5 cm de espesor, posee diminutos vellos en su superficie, mientras que, en el interior de la corteza del raquis, se hallan fibras largas dispuestas en sentido longitudinal, de un tono blanco cuando no han comenzado a descomponerse, conservando una alta humedad.<sup>21</sup> Además es considerado como un subproducto de la cosecha del mismo. El raquis compuesto por agua (93%), materia sólida (7%), este % de materia sólida el 40% es fibra, 53% celulosa y 11.7% lignina, es por ello que se dice que es un residuo con alto contenido de celulosa con el cual se puede producir diferentes productos.<sup>22</sup>

#### **1.5 Materia lignocelulósica**

El componente lignocelulósico, principalmente integrado por celulosa, hemicelulosa y lignina, exhibe una composición que fluctúa según la genética de las plantas, las condiciones ambientales y los procesos de producción.<sup>23</sup> Este recurso despierta un interés considerable por su potencial versátil en diversos ámbitos, resaltando su proporción aproximada del 40-60 % en celulosa, 30-40 % en hemicelulosas y 10-25 %

en lignina, cifras que pueden variar dependiendo de la naturaleza del material. Esta flexibilidad lo posiciona como un componente esencial en la industria, donde su utilización puede ser clave en la fabricación de productos y materiales respetuosos ambiente.<sup>14</sup>

Figura 1. Componentes del material lignocelulósico



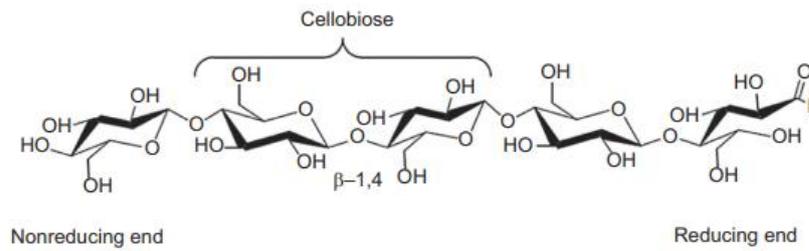
Fuente: Evaluación Del Desempeño Del Pretratamiento Con Peróxido de Hidrógeno Sobre Bagazo de Caña de Azúcar Para Remoción de Lignina.<sup>24</sup>

### 1.5.1 Componentes de la materia lignocelulósica

**1.5.1.1 Celulosa.** La celulosa es considerada como un polímero natural, con una estructura cristalina, que está constituido por la unión de monosacáridos y por unidades de glucosa, aproximadamente de 3000 a 10000 unidades de glucosa, además es considerada una fibra que aporta propiedades estructurales en las paredes de las células vegetales, dado que posee una resistencia mecánica alta y una estabilidad química.<sup>25</sup>

Las cadenas de celulosa se alinean en paralelo mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, lo que resulta en una estructura cristalina. La conversión de celulosa en glucosa ha sido objeto de investigación debido a que la glucosa resultante puede emplearse para la producción de diversos biocombustibles, como el bioetanol.<sup>26</sup>

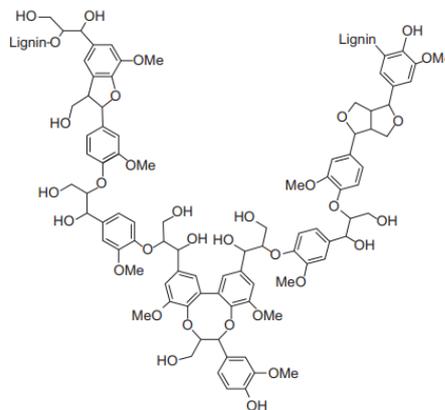
Figura 2. Estructura de cadena de celulosa



Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composite<sup>27</sup>

**1.5.1.2 Lignina.** La lignina, un polímero con propiedades aromáticas, surge de la polimerización deshidrogenativa de tres alcoholes fenilpropiónicos (P-cumarílico, coniferílico y sinapílico). La unión entre los distintos monómeros ocurre mediante enlaces carbono-carbono y enlaces tipo éter entre los anillos aromáticos, y los radicales de la misma. Su composición varía notablemente entre especies vegetales; se halla químicamente entrelazada y mezclada con la celulosa y la hemicelulosa, en especial con esta última. La lignina actúa como un escudo protector que resguarda la celulosa de diversos ataques y de la descomposición natural de la planta. Es responsable principal de la resistencia de las paredes celulares vegetales y se concentra mayormente en la lámina media, donde puede llegar a constituir hasta el 75% del total. Además, puede brindar defensa contra patógenos y daños mecánicos.<sup>25</sup>

Figura 3. Estructura de cadena de lignina

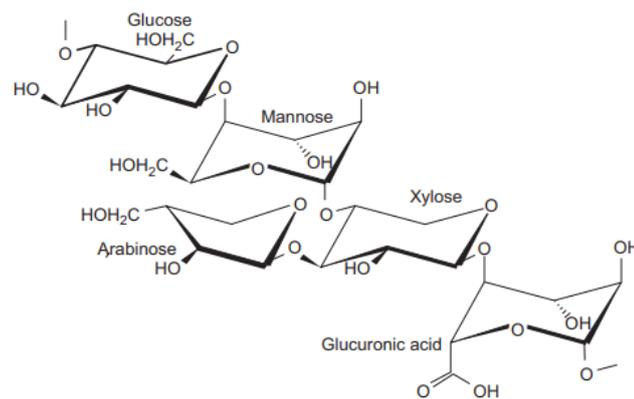


Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites.<sup>27</sup>

1.5.1.3 *Hemicelulosa*. La hemicelulosa es considerada el segundo polisacárido más común en la naturaleza, posee una estructura amorfa, es conocido como un grupo de heteropolisacárido, compuesta por azúcares tales como; la xilosa, arabinosa, galactosa y manosa. Se presenta en las paredes celulares de las plantas, la hemicelulosa genera un gel acuoso el cual envuelve las microfibrillas de celulosa.<sup>25</sup>

En comparación con la celulosa, la hemicelulosa posee una masa molecular más baja, está constituida por cadenas laterales cortas como ramificadas de diferentes polímeros de azúcares lo cual facilita su descomposición mediante hidrólisis. Además, su estructura y composición pueden variar significativamente entre diferentes especies vegetales.<sup>26</sup>

Figura 4. Estructura de cadena de hemicelulosa



Fuente: Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composite.<sup>27</sup>

## 1.6 Nanocelulosa

La nanocelulosa es un material de valor agregado que se deriva de la celulosa, la cual puede ser obtenida de residuos agrícolas, mediante a diferentes métodos de extracción, ya sean físicos, químicos o biológicos, y su dimensión deben estar comprendidos dentro del rango de los nanómetros.<sup>28</sup> Durante los últimos años, el desarrollo de las nanofibras de celulosa ha captado el interés científico e industrial, debido a sus propiedades, como su baja densidad, alta biodegradabilidad, resistencia, flexibilidad y rigidez, entre otros; lo que hace que este material sea muy versátil para la aplicación en diferentes procesos.<sup>16</sup>

Las nanocelulosas dependiendo del método de extracción, su morfología, y funcionalidad, se subdivide en los siguientes tipos: nanocelulosa bacteriana (Bacterial Nanocellulose - BNC), nanofibras de celulosa (Cellulose Nanofibers - CNF) y nanocristales de celulosa (Cellulose Nanocrystals - CNC).<sup>29</sup>

**1.6.1 Celulosa bacteriana.** La nanocelulosa bacteriana (NCB), son fibras torcidas, que tienen forma de cinta. La celulosa que se requiere para producir las nanocelulosa, es obtenida por la secreción de bacterias aeróbicas (crecer en presencia de oxígeno), como las que pertenecen a los géneros *Acetobacter xylinum* y *Gluconacetobacter xylinus*, además de *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Sarcina* o *Alcaligenes*, estas bacterias usan como sustrato azúcares monoméricos o monosacáridos de bajo peso molecular.<sup>29,30</sup> Este tipo de nanocelulosa tiene un alto grado de cristalinidad (84% - 89%), polimerización y pureza.<sup>31</sup>

Las nanocelulosas bacterianas eran costosas de obtener debido a los cultivos de la bacteria, no obstante, se observó que los residuos lignocelulósicos agroindustriales son una buena fuente de carbono para la fermentación y el crecimiento de las bacterias. Con el aprovechamiento de un residuo los costos de obtención de este material se reducen lo que hace que sean atractiva para desarrollar, y aplicarla para procesos como: membranas de parlantes, piel artificial, células de bicombustibles, entre otros.<sup>16</sup>

**1.6.2 Nanocristales de celulosa.** Los nanocristales de celulosa (NCC), son partículas sólidas en forma de varilla, con un rango en sus dimensiones que van de 100 a 500 nm de largo y 5 a 15 nm de ancho, dependiendo de su origen y su tratamiento pueden tener una pureza del 90%.<sup>30</sup> Los CNC generalmente se obtienen por hidrólisis con ácidos inorgánicos fuertes, como: ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico, ácido bromhídrico y ácido nítrico, con este proceso se aísla la celulosa, con la cual se deja región cristalina, disolviendo la región amorfa y los componentes no celulósicos.<sup>29</sup>

**1.6.3 Nanofibras de celulosa.** Las nanofibras de celulosa (NFC), son diminutas fibras en forma de hilos largos y flexibles, compuestas por dominios alternados cristalinos (estructura ordenada) y amorfos (estructura desordenada que le da la flexibilidad), entre sus dimensiones tienen un diámetro de 1 - 100 nm y una longitud de 500 - 2000 nm.<sup>16</sup> Además, se encuentran entrelazadas, tienen la capacidad de formar redes densas unidas fuertemente por enlaces de hidrogeno interfibrilar. Se obtiene principalmente, por métodos mecánicos, y se caracteriza por tener excelentes propiedades como:

resistencia mecánica, presenta un carácter hidrofílico, alta cristalinidad, gran área superficial, transparencia, elevada rigidez.<sup>8</sup>

*1.6.3.1 Propiedades.* Este revolucionario material sustentable, con una amplia gama de propiedades sobresalientes, se destaca en el ámbito de la ingeniería y la ciencia de los materiales. Su capacidad para ser dimensionado a una escala nanométrica les confiere versatilidad y adaptabilidad a diversas aplicaciones, mientras que exhibe una rigidez excepcional y una estabilidad notable en ambientes adversos y temperaturas elevadas. Esto lo convierte en una opción ideal para entornos de alta exigencia. Su superficie altamente modificable y su estructura cristalina ofrecen oportunidades únicas para la ingeniería de materiales a medida y aplicaciones avanzadas. Además, su destacada resistencia específica lo hace altamente durable y confiable en condiciones extremas.<sup>28</sup>

Por otro lado, este material se distingue por su baja conductividad térmica renovable, lo que no solo contribuye a la eficiencia energética, sino que también amplía su potencial de aplicación en áreas donde el control térmico es crucial. A pesar de estas cualidades sobresalientes, es accesible en costos, lo que lo convierte en una opción atractiva desde una perspectiva técnica y económica. Es importante tener en cuenta que la complejidad de este material varía dependiendo de las características específicas de la materia prima utilizada y de los procesos de fabricación empleados.<sup>28</sup>

*1.6.3.2 Aplicaciones industriales.* Las nanofibras de celulosa se están utilizando cada vez más en una variedad de aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas. Según un artículo publicado en "Industrial Crops and Products", estas aplicaciones incluyen:<sup>32</sup>

- Refuerzo de materiales compuestos. Las nanofibras de celulosa pueden incorporarse en matrices poliméricas para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, como la resistencia y la rigidez. Esto los hace útiles en la fabricación de productos como componentes automotrices y aeroespaciales.
- Embalaje sostenible. Las nanofibras de celulosa pueden utilizarse para desarrollar materiales de embalaje biodegradables y compostables, ofrecen una alternativa ecológica a los plásticos convencionales y son adecuados para aplicaciones de embalaje en diversos sectores industriales.
- Filtración y separación. Las nanofibras de celulosa tienen una estructura porosa que las hace efectivas para la filtración de líquidos y gases. Se utilizan en

aplicaciones como la purificación de agua, la filtración de aire y la separación de componentes en procesos industriales.

- Recubrimientos funcionales. Las nanofibras de celulosa pueden formar recubrimientos delgados con propiedades barrera y antimicrobianas, se aplican en envases de alimentos, productos farmacéuticos y textiles para mejorar su durabilidad y seguridad.
- Electrónica flexible. Las nanofibras de celulosa se están explorando como sustratos flexibles para dispositivos electrónicos, como pantallas y sensores. Su alta transparencia óptica y flexibilidad los hacen prometedores para aplicaciones en electrónica portátil y dispositivos médicos.
- En medicina y biomedicina, se emplea en la creación de piel artificial para tratar quemaduras y úlceras, así como en la entrega controlada de medicamentos y en apósitos antimicrobianos para heridas.
- En cosmética, su papel como estabilizador de emulsiones se destaca en la formulación de cremas y tónicos. En la industria alimentaria, se utiliza para producir celulosa comestible, como la nata de coco.<sup>32</sup>
- Industria del papel, mejora la flexibilidad y durabilidad de los productos,
- Construcción y los polímeros, actúa como material de refuerzo,
- Electrónica, se emplea en la fabricación de componentes opto-electrónicos.<sup>33</sup>

De tal forma, se puede mencionar que, las nanofibras de celulosa tienen un gran potencial para una amplia gama de aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas y su sostenibilidad ambiental. Su uso está en aumento en sectores como la automoción, el embalaje, la filtración, los recubrimientos y la electrónica.<sup>32</sup>

## **1.7 Métodos de extracción**

*1.7.1 Métodos químicos.* En los métodos químicos se usan diferentes tipos de ácidos, bases y disolventes, tanto diluidos como concentrados, para eliminar impurezas propias del material lignocelulósico y degradar los componentes no celulósicos.<sup>27</sup>

*1.7.1.1 Tratamiento alcalino.* El tratamiento alcalino se lo emplea en materiales lignocelulósicos para la descomposición de su estructura cristalina, estos materiales (fibras naturales) se introducen en una solución de NaOH a un tiempo y temperatura determinada, mediante este proceso se altera la superficie de las mismas, eliminando

los componentes no celulósicos como la lignina y hemicelulosa. Después de este tratamiento las fibras se vuelven amarillas cuando la concentración del NaOH aumenta, es por ello que requiere de otro tratamiento químico como es el blanqueamiento.<sup>27</sup>

*1.7.1.2 Blanqueamiento.* Generalmente las etapas de blanqueo de celulosa son tratamientos ácidos o alcalinos y se utilizan productos químicos como: clorito de sodio ( $\text{NaClO}_2$ ), hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) y peróxido ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), sobre parámetros de presión y temperatura atmosféricas lo cual provoca la degradación de la lignina cambiando su estructura, incluyendo también a la celulosa y hemicelulosa pues los enlaces participantes éster y glucosídicos se ven afectados.<sup>34</sup>

*1.7.1.3 Hidrólisis ácida.* Se conoce que la hidrólisis ácida es favorable para la obtención de azúcares fermentables, en el cual varían ciertas condiciones tales como la concentración y la temperatura<sup>35</sup> participan sustancias ácidas concentradas o en dilución entre ácido nítrico  $\text{HNO}_3$ , ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , ácido clorhídrico  $\text{HCl}$ , ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , para la descomposición de la celulosa, hemicelulosa separando de tal manera, a su forma elemental.<sup>28,35</sup>

La hidrólisis ácida provoca una protonación rápida del oxígeno glucosídico, lo que provoca la adición de agua para romper el enlace y producir dos fragmentos de cadena más cortos.<sup>36</sup>

*1.7.2 Métodos físicos.* Los métodos físicos son fundamentales para la modificación de la estructura de la biomasa, aumentando el área superficial reduciendo el tamaño de partículas, mediante una serie de pasos sencillos como molienda, trituración y pulverización de la materia, así como el secado, microondas, explosión de vapor, etc.<sup>37</sup>

*1.7.2.1 Explosión de vapor.* La explosión de vapor es un pretratamiento de origen hidrotermal, con el cual se somete el material lignocelulósico, a presión de vapor y altas temperaturas, con el que se consigue la despolimerización de la lignina, haciendo que salgan las fibras de celulosa.<sup>37</sup>

Se destaca como uno de los pretratamientos más eficaces para maderas duras y residuos agrícolas, aunque su eficiencia es menor en el caso de maderas blandas. La biomasa se somete a vapor saturado a temperaturas que oscilan entre 160-260 °C (0.69-4.83 MPa). En el transcurso de la detonación de vapor, se generan ácido acético y otros ácidos orgánicos mediante la hidrólisis de la hemicelulosa, contribuyendo así a la ruptura de los enlaces éster y éter en la matriz de celulosa-hemicelulosa-lignina. Los

factores que influyen en este proceso incluyen el tiempo de tratamiento, la temperatura, el tamaño de las partículas y el contenido de humedad.<sup>38</sup>

Este se ha convertido en un método de pretratamiento popular debido a su bajo uso de productos químicos y bajo consumo de energía, debido a que se obtienen los mismos tamaños que con los métodos físicos, no obstante, se requiere 70% menos de energía.<sup>38</sup>

### 1.7.3 Métodos biológicos.

**1.7.3.1 Enriado biológico al aire libre.** Este método de enriamiento, caracterizado por su bajo costo, implica exponer las vainas de plátano al ambiente exterior, permitiendo que los microorganismos presentes en el proceso de descomposición separen los haces fibrilares. Sin embargo, esta técnica conlleva la consecuencia de que las fibras extraídas presenten variaciones en sus propiedades, dado que las condiciones de temperatura y humedad no son consistentes. Como resultado, la calidad de la fibra puede verse comprometida fácilmente, ya que corre el riesgo de dañarse. Este proceso de enriamiento suele requerir un período de entre veintiún y cuarenta y dos días para extraer la fibra del plátano.<sup>39</sup>

La descomposición de la fibra mediante tratamiento biológico se lleva a cabo gracias a la acción de diversos microorganismos, como hongos y bacterias, que tienen la capacidad de degradar la estructura compleja de la pared vegetal mediante la actividad de enzimas específicas como celulasas y enzimas que modifican la lignina. Para mejorar la eficacia de los pretratamientos, se pueden emplear microorganismos con alta capacidad lignocelulolítica, como hongos de la podredumbre blanca, o se pueden utilizar diferentes variantes de consorcios microbianos que logran una degradación más completa de la pared celular vegetal. Se puede mencionar que, estos co-cultivos representan una solución eficiente en la biotransformación de sustratos complejos. Se menciona ampliamente que los géneros *Curvularia* y *Trichoderma* son microorganismos con alta capacidad lignocelulolítica.<sup>40</sup>

La hidrólisis enzimática es un método moderno para obtener nanopartículas de celulosa de manera eficiente en términos de energía. Durante este proceso, se forman nanofibras cristalinas conectadas a una fase amorfa. Generalmente, se emplean pulpas blanqueadas como punto de partida, que luego se tratan con enzimas, principalmente celulasas. A menudo, se combinan técnicas mecánicas para mejorar la accesibilidad de las fibras celulósicas. Durante la hidrólisis enzimática, la estructura de la biomasa cambia a una escala nanométrica, lo que afecta la forma en que las enzimas pueden

acceder y descomponer la celulosa. Esto se debe a que las enzimas continuamente modifican el tamaño y la forma de las fibrillas, así como el área superficial disponible para la reacción.<sup>28</sup>

*1.7.4 Combinación de los métodos.* Los pretratamientos mecánicos, químicos y enzimáticos se usan para mejorar la producción de nanofibras de celulosa (CNF) y reducir el consumo de energía. Dentro de estos métodos se encuentra la homogeneización a elevadas presiones, micro fluidización, molienda y refinado. Estos métodos se pueden aplicar individualmente o en combinación según las necesidades del proceso y las propiedades deseadas del producto final. A pesar de estos pretratamientos, a veces es difícil obtener un producto homogéneo, razón por la cual se opta por la combinación de estos métodos.<sup>41</sup>

Métodos como la hidrólisis ácida presenta alta cristalinidad pero con desecho de grandes cantidades de aguas ácidas, mientras que la desintegración mecánica tiene alta pureza pero alto consumo energético, las bacterias aerobias generan gran pureza y cristalinidad pero bajo rendimiento, y la hidrólisis enzimática es respetuosa con el medio ambiente sin embargo necesita mayor tiempo de preparación, el electro hilado es versátil pero propenso a aglomeración, por otra parte la homogeneización es eficiente pero con desventajas como obstrucción y disminución de estabilidad térmica, la molienda es rápida pero con necesidad de mantenimiento y con el refinado se aumenta superficie pero disminuye longitud y cristalinidad.<sup>28</sup>

Cada método tiene su ventaja es por ello que se los puede combinar y aprovechar de mejor manera lo que cada uno ofrece, para obtener una mejor extracción de celulosa, al utilizar una combinación de tratamientos, se puede optimizar la extracción de celulosa según las características específicas del raquis de banano, logrando así una mayor eficiencia y mejor calidad del producto final.

## **1.8 Caracterización de las nanofibras de celulosa**

*1.8.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB).* En el análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o en sus siglas en inglés SEM) se vale de una corriente de partículas diminutas para examinar la superficie de la muestra. Estas partículas dispersas son colectadas para formar una imagen detallada, que gracias a esta técnica, se pueden explorar tanto la composición química como la estructura material a escalas minúsculas, permitiendo así un entendimiento profundo de la organización interna de una variedad de materiales.<sup>42</sup>

Por otro lado, las propiedades morfológicas de las nanoestructuras de celulosa, tales como las nanofibras de celulosa (NFC), pueden ser observadas a pesar de sus dimensiones y formas irregulares. Estas nanoestructuras pueden tomar diferentes formas, desde placas delgadas hasta fibras individuales, dependiendo del proceso de autoensamblaje durante su formación. Aspectos como la concentración, cristalinidad y cambios en la carga superficial también influyen en su morfología. Por lo tanto, es esencial realizar una observación detallada de estas características para entender mejor sus propiedades y aplicaciones en diversas áreas.<sup>43</sup>

*1.8.2 Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).* La Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica fundamental para analizar los grupos funcionales, la estructura molecular. Para obtener el espectro de absorción, se utiliza un instrumento llamado espectrofotómetro, que emite un haz de radiación infrarroja que atraviesa la muestra, esta interacción de la radiación infrarroja con los enlaces covalentes presentes en dichos materiales, produce vibraciones moleculares específicas, las mismas que revelan información sobre la composición química y los enlaces presentes en la muestra.<sup>44</sup> Para determinar los grupos funcionales (OH-) en la celulosa se usan intervalos de medición en la escala de absorbancia desde 4000 a 700  $\text{cm}^{-1}$ .<sup>45</sup>

La FTIR tiene una amplia gama de aplicaciones en áreas como la química, la farmacología, la ciencia de materiales y la biología, ya que permite identificar con precisión y rapidez diversos compuestos.

Tabla 1. Principales bandas de los espectros FTIR para las NFC

Longitud de onda		Componentes	Grupo Funcional
3700	3200	OH	Celulosa <sup>46</sup>
3414	3412	OH	Celulosa <sup>46</sup>
2900	2700	C-H	Celulosa- Hemicelulosa <sup>47</sup>
1730	1700	C=O	Ácido Carboxílico <sup>48</sup>
1600	1500	N-C-O	Lignina <sup>49</sup>
1600	1475	C-C	Lignina <sup>48</sup>
1433	1428	C-6	Celulosa <sup>47</sup>

Tabla 2. (Continuación)

	<b>Longitud de onda</b>	<b>Componentes</b>	<b>Grupo Funcional</b>	
	1336	1000	C6	Celulosa <sup>50</sup>
	1317	1317	C-O	Celulosa-Carbonil <sup>49</sup>
	1428	1311	CH2	Celulosa <sup>51</sup>
	1300	1000	C-O-C	Celulosa <sup>47</sup>
	1294	1241	C-O	Lignina <sup>49</sup>
	1100	1160	C-O-C	Celulosa <sup>52</sup>
	1160	1000	C-O-C	Celulosa <sup>49</sup>
	896	894	C-H	Celulosa <sup>50</sup>
	588	662	C-OH	Carboxilo <sup>49</sup>
	527	521	C-O-C	Celulosa <sup>53</sup>

Fuente: Autoría propia

**1.8.3 Potencial de Carga cero.** El potencial de carga cero (PCC) es fundamental en las teorías de la doble capa eléctrica (EDL), indicando el punto donde la superficie de un material no tiene carga neta. Al alejarse de este punto, se forman contraiones que crean la doble capa eléctrica. Medir el PCC en electrodos metálicos es difícil debido a la preparación de electrodos monocristalinos y la adsorción específica de iones.<sup>54</sup>

El PCC se encuentra graficando  $\text{pH}_{\text{inicial}}$  vs  $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH}_{\text{inicial}} - \text{pH}_{\text{final}}$ ).<sup>55</sup> El  $\text{pH}$  en el potencial de carga cero ( $\text{pH}_{\text{PCC}}$ ) determina el  $\text{pH}$  donde la superficie de un adsorbente es eléctricamente neutra:

- Cuando el  $\text{pH}$  es menor que el  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es positiva.
- Cuando el  $\text{pH}$  es igual al  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es neutra.
- Cuando el  $\text{pH}$  es mayor que el  $\text{pH}_{\text{PCC}}$ , la superficie es negativa.

Esta variación en la carga superficial influye en la capacidad de adsorción del material. Una carga negativa favorece la adsorción de cationes, mientras que una carga positiva favorece la adsorción de aniones.<sup>56</sup> La carga superficial en fase acuosa se modifica por la absorción de iones y se estudia con curvas de consumo de protones, convergiendo en el PCC.<sup>57</sup>

## 1.9 Viabilidad Económica

1.9.1 *CAPEX*. Abreviatura de Capital Expenditure, se refiere a los fondos destinados a adquirir, mejorar o mantener activos físicos a largo plazo, cruciales para la capacidad productiva y la expansión de operaciones. Es esencial disponer de un presupuesto CAPEX preciso al iniciar o mantener un inventario, revisar los gastos operativos (OPEX), y calcular el capital necesario para las necesidades de cada departamento, determinando así el presupuesto anual requerido.<sup>58</sup> Dentro de este presupuesto se incluyen costos tales como, los equipos de procesamiento, el manejo del agua, la infraestructura, el desarrollo y los costos de abandono.<sup>59</sup>

1.9.2 *OPEX*. Los costos operativos se dividen en variables y fijos. Los costos variables incluyen mano de obra, mantenimiento, combustibles y productos químicos, mientras que los costos fijos abarcan servicios públicos, alquiler de equipamiento, seguros y gastos generales y administrativos. Además, hay otros costos relacionados con transporte y logística, personal y materiales, y otros costos operativos no previamente mencionados. Estos costos se agrupan y se clasifican en fijos o variables según las áreas analizadas y la diversidad de los resultados obtenidos.<sup>59</sup>

Tabla 3. CAPEX OPEX – Costos fijos/variables

Rama	Tipo	Fijo/Variable
CAPEX	Instalaciones	Fijos
	Equipamiento	Fijos/Variables
	Perforaciones	Variables
	Gasoducto/oleoducto	Fijos
	Abandono	Fijos
	Otros CAPEX	Fijos/Variables
	Campos Fijos	Fijo
OPEX	Campos Fijos	Fijos
	Campos Variables	Variables
	Transporte	Variables
	Otros OPEX	Variables
IMPUESTO	Regalías	Variables
	A las ventas	Variables
	A la Renta	Variables
	Otros	Variables

Fuente: Gestión de servicios enfocados a OPEX en lugar de CAPEX<sup>58</sup>

## **CAPITULO II**

### **2. METODOLOGÍA**

#### **2.1 Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo analítico y comparativo, involucra la síntesis de nanofibras de celulosa utilizando métodos físicos, químicos y biológicos, seguido de la caracterización morfológica de las nanofibras de celulosa.

#### **2.2 Diseño de investigación**

La investigación tuvo un diseño experimental, donde se desarrolló la manipulación de variables, en el cual se utilizó una combinación de los métodos físicos, químico y biológicos para la determinación de componentes lignocelulósicos. Además, para la caracterización de las NFC se aplicaron las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB), la espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (EITF) y  $\text{pH}_{\text{pzc}}$ .

#### **2.3 Enfoque de investigación**

Tuvo un enfoque mixto cualitativo – cuantitativo, debido a que se caracterizó y evaluó de la viabilidad económica de los métodos para la obtención de las nanofibras de celulosa.

#### **2.4 Ubicación Geográfica**

La parte experimental se realizó en los laboratorios de investigación de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, de la Universidad Técnica de Machala.

#### **2.5 Población de estudio**

El recurso vegetal utilizado en la investigación corresponde a los residuos de banano, específicamente el raquis. Mientras que el objeto de estudio la investigación fueron los métodos para obtención de nanofibras de celulosa.

#### **2.6 Variables**

Las variables a tratar en la investigación fueron variables dependientes e independientes. Las variables independientes fueron los diferentes métodos de extracción de las nanofibras de celulosa por método biológico físico y químico, y la variable dependiente analizadas fueron nanofibras de celulosa, con esto se evaluó cómo diferentes métodos de extracción influyen en sus características.

## 2.6 Materiales, reactivos y equipos

En el presente estudio, se emplearon múltiples materiales, reactivos y equipos para la extracción y caracterización de nanofibras de celulosa. La tabla a continuación proporciona una descripción detallada de los elementos necesarios para que se lleve a cabo los procedimientos experimentales.

Tabla 4 Descripción de los materiales, reactivos y equipos a utilizar.

Materiales	Reactivos	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balón volumétrico de 100ml, 250ml, 500ml, 1000ml</li> <li>• Probeta de 100ml</li> <li>• Pipeta graduada</li> <li>• Varilla de agitación</li> <li>• Barras de agitación magnética</li> <li>• Frascos para reactivos de 250 ml</li> <li>• Embudo</li> <li>• Papel filtro</li> <li>• Matraz de 250ml y 500ml</li> <li>• Fundas con auto cierre</li> <li>• Piseta</li> <li>• Pinzas</li> <li>• Espátula</li> <li>• Tamiz malla 250 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Termómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidróxido de sodio NaOH pureza 98.8% (Fisher scientific)</li> <li>• Peróxido <math>\text{H}_2\text{O}_2</math> 10V</li> <li>• Ácido clorhídrico HCl pureza 37.4% (Fisher chemical)</li> <li>• <i>Trichoderma spp</i> (Equabiológica)</li> <li>• Carboximetilcelulosa</li> <li>• Sulfato de amonio concentrado <math>(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4</math> (Fisher chemical)</li> <li>• Fosfato diádico de potasio concentrado <math>\text{K}_2\text{HPO}_4</math> (Fisher chemical)</li> <li>• Ácido cítrico <math>\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7</math></li> <li>• Citrato de sodio <math>\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7</math> (Fisher scientific)</li> <li>• Agua destilada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balanza analítica (OHAUS PIONEER)</li> <li>• Estufa (MEMMERT VN6400 4051785)</li> <li>• Campana de extracción (LABCONCO)</li> <li>• Molino de cuchillas</li> <li>• pH-metro (OHAUS AQUASEARCHER)</li> <li>• Agitador orbital (INFORS HT Celltron)</li> <li>• Plancha de calentamiento (CIMAREC SP131015)</li> <li>• Reactor hidrotermal con cámara de Teflón</li> <li>• Microscopio electrónico de barrido</li> <li>• Espectrómetro infrarojo</li> <li>• Liofilizador</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

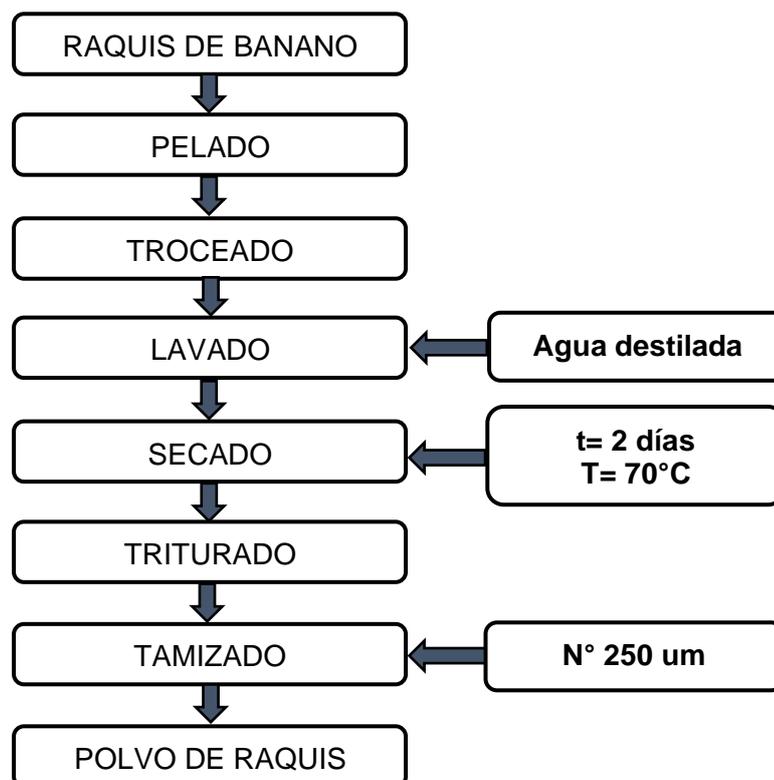
## 2.7 Desarrollo experimental

### 2.7.1 Preparación de la muestra.

Se recolectó la materia prima (raquis de banano), de la Universidad Técnica de Machala, en la facultad de Ciencias Agropecuarias, luego de la recolección realizó el lavado, pelado y troceado (cubitos 1cm aprox) de materia prima se obtuvo 6.91 kg, luego del proceso de troceado se sumerge en agua destilada, para evitar la oxidación, a continuación se realizó un último lavado con agua destilada con el fin de eliminar impurezas presentes en nuestra muestra, seguidamente se secó la muestra con toallas adsorbentes para reducir la humedad y se lo llevó a la estufa a 70°C por 48 horas, pasado este tiempo se consiguió 345.30 g de raquis seco.<sup>60</sup>

Una vez que se obtuvo la muestra seca, se trituró y tamizo con un tamiz de 250um, se obtuvo 304.08 g raquis particulado (polvo). Finalmente se almacenó este raquis particulado en frascos ámbar para prever que la luz afecte sus propiedades y conservar la muestra.

Figura 5. Obtención del polvo del raquis de banano

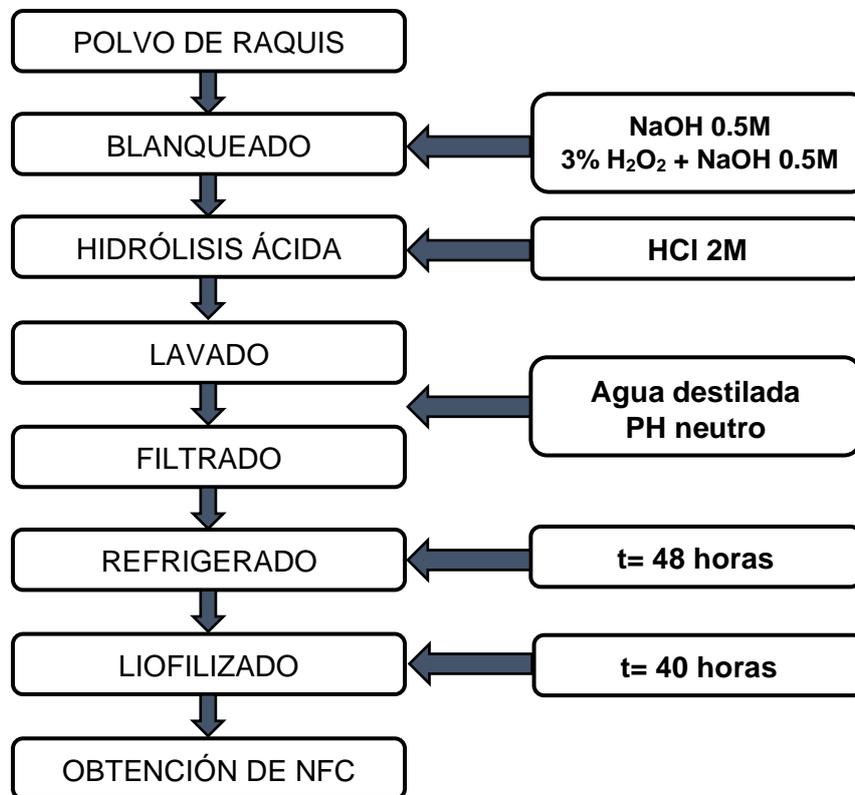


Fuente: Autoría propia

## 2.7.2 Métodos de obtención de nanofibras de celulosa.

2.7.2.1 Método 1 - Tratamiento químico (Q). Se siguió con la metodología establecida, se hizo ciertas modificaciones<sup>61</sup>. A continuación, se muestra el diagrama de flujo del proceso del método 1 para la obtención de nanofibras por tratamiento químico.

Figura 6. Diagrama de flujo de tratamiento químico



Fuente: Autoría propia

Para comenzar, se pesó 15 gr de polvo de raquis, el cual paso primeramente por el tratamiento alcalino, para esto se preparó una solución de 300ml de 0.5M de NaOH, para ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$\frac{40g NaOH}{1 mol NaOH} * \frac{0.5 mol NaOH}{1 L} * 0.30 L = 6g NaOH$$

En un matraz se sumergió los 15 gr de polvo de raquis con los 300ml de NaOH 0.5M, con ayuda de una plancha de agitación, se colocó la muestra a 30°C por 18h, luego se lavan las muestras, mediante decantación y filtración, este procedimiento se realizó hasta que la muestra alcanzó un pH neutro. Simultáneamente se siguió con el blanqueamiento, el cual consiste en preparar una solución binaria de 200ml con NaOH

0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3% en peso. Se empezó con el cálculo para hacer una solución de 3% peróxido de hidrógeno en un volumen de 200ml, para ello se empleó la ecuación (1)

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (1)$$

Donde:

*C<sub>1</sub>*: Solucion concentrada %

*V<sub>1</sub>*: Volumen de solucion concentrada a diluir L

*C<sub>2</sub>*: Solucion diluida %

*V<sub>2</sub>*: Volumen de solucion diluida L

$$V_1 = \frac{0.30 * 200 \text{ ml}}{0.60} = 100 \text{ ml H}_2\text{O}_2$$

Se tomaron 100 ml de la solución concentrada al 6% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la cual se diluye en un balón volumétrico de 200ml con agua destilada consiguiendo una solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, esta sirvió como solución base para adicionar el NaOH que se calcula a continuación.

$$\frac{40g \text{ NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} * \frac{0.5 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ L}} * 0.20 \text{ L} = 4g \text{ NaOH}$$

Se pesó 4g de NaOH para mezclarlos con la solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, una vez realizada esta solución, se mezcló junto con la muestra en la plancha de agitación magnética a una temperatura de 45°C por un tiempo de 14h. Pasado este tiempo, se realizó el lavado mediante decantación, luego se filtra y se lava nuevamente hasta llegar a un pH neutro.

Posteriormente, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, se preparó una solución de 200 ml ácido clorhídrico (HCl) 2 M a partir de una solución de HCl al 37%, para ello se realizaron los cálculos en los que se emplearon las ecuaciones (2) y (1), como se detalla a continuación:

$$\frac{37 \text{ ml HCl}}{100 \text{ ml de sol. conc.}} * \frac{2500 \text{ ml de sol. conc.}}{1} * \frac{1.19 \text{ g HCl}}{1 \text{ ml HCl}} = 1100.75 \text{ gr HCl}$$

$$M = \text{moles soluto/L solucion} \quad (2)$$

$$M = 12.08 \text{ M}$$

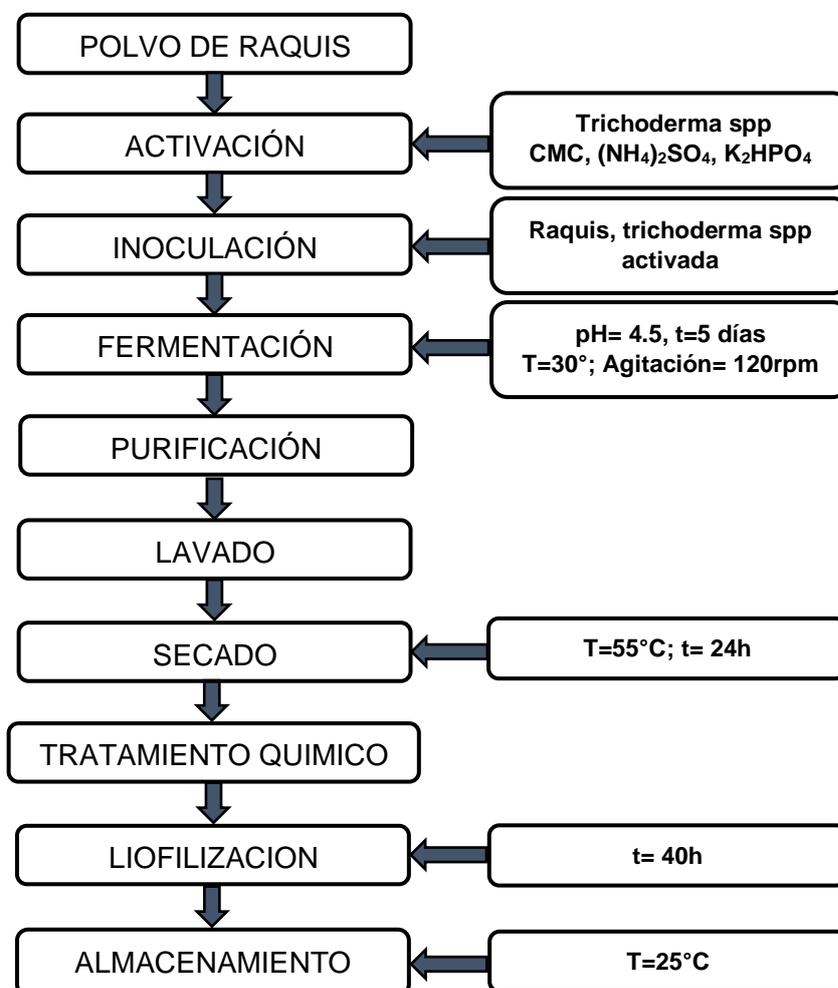
$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (1)$$

$$V_1 = 33.11 \text{ ml}$$

En la solución de HCl 2M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y sometió a agitación en una plancha de agitación y calentamiento a 55°C durante 2 h, pasado este tiempo se lavó la muestra obtenida, primero por decantación y luego por filtración hasta llegar a un pH neutro. Finalmente se colocaron las muestras en frascos con tapa esterilizados y se sometieron a congelación por 24 horas, posteriormente, las muestras fueron liofilizadas por 40h, por último, se almacenó en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

2.7.2.2 *Método 2 - Enriado biológico y tratamiento químico (BQ).* Para este método se realizó el enriado biológico, el cual consta en la activación, incubación del hongo *Trichoderma spp* e inoculación del mismo con la muestra del polvo de raquis, el remanente insoluble obtenido se seca y se lo trata con el método químico, como se muestra en el siguiente diagrama.<sup>62</sup>

Figura 7. Diagrama de flujo para la obtención de nanofibras por enriado biológico y tratamiento químico



Fuente: Autoría propia

Enriado biológico: Se preparó una solución de 250 ml Buffer (citrato de sodio + ácido cítrico), para esto se realizan los cálculos respectivos previamente, con los cuales se preparó las siguientes soluciones:

Solución de 250 ml de citrato de sodio  $Na_3C_6H_5O_7$  a 0.05M

$$\frac{258.06 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } Na_3C_6H_5O_7} * \frac{0.05 \text{ mol } Na_3C_6H_5O_7}{1 \text{ L}} * 0.25 \text{ L} = 3.226 \text{ g } Na_3C_6H_5O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M

$$\frac{192.12 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } C_6H_8O_7} * \frac{0.5 \text{ mol } C_6H_8O_7}{1 \text{ L}} * 0.1 \text{ L} = 9.606 \text{ g } C_6H_8O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico  $C_6H_8O_7$  a 0.75 M

$$\frac{192.12 \text{ g/mol}}{1 \text{ mol } C_6H_8O_7} * \frac{0.75 \text{ mol } C_6H_8O_7}{1 \text{ L}} * 0.1 \text{ L} = 14.409 \text{ g } C_6H_8O_7$$

El volumen total de la solución Buffer es de 250ml, para la preparación del mismo en un balón volumétrico aforado de 250ml, se realizó la solución base de citrato de sodio, para esto se pesó 3.226 g de citrato de sodio y se disolvió en 230 ml de agua destilada con esto se obtuvo una solución con pH de 8.2 aprox. ligeramente alcalino, es por ello que con las soluciones de ácido cítrico se ajustó pH a 4.5, para esto se colocó en buretas las solución de ácido cítrico y se hizo caer gota a gota, mientras estaba en agitación, al mismo tiempo fue tomando el pH. Se debe tener cuidado y no pasarse del aforo de 250 ml, ni del valor del pH, si no se llegase al aforo con el ácido, se adiciona agua destilada y se comprueba que el pH sea el correcto.

Una vez que se preparó la solución BUFFER, se trasvasa a un matraz Erlenmeyer y se pesaron los compuestos de sulfato de amonio y fosfato di ácido de potasio, que aportaron los nutrientes (10% N, 3% S, 5% P) necesarios para la activación del *Trichoderma spp*, para saber la cantidad necesaria se realizó los respectivos cálculos.

Cálculo de N con  $(NH_4)_2SO_4$

$$\frac{10N}{100} * \frac{132.14 \text{ g } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} * \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } N} * \frac{1 \text{ mol } N}{28 \text{ g } N} = 0.472 \text{ g } (NH_4)_2SO_4$$

Cálculo de S con  $(NH_4)_2SO_4$

$$\frac{3S}{100} * \frac{132.14 \text{ g } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4} * \frac{1 \text{ mol } (NH_4)_2SO_4}{1 \text{ mol } S} * \frac{1 \text{ mol } S}{32 \text{ g } S} = 0.124 \text{ g } (NH_4)_2SO_4$$

Cálculo de P con  $KH_2(PO_4)$

$$\frac{5P}{100} * \frac{136g KH_2(PO_4)}{1 mol KH_2(PO_4)} * \frac{1 mol KH_2(PO_4)}{1 mol P} * \frac{1 mol P}{31 g P} = 0.219 g KH_2(PO_4)$$

Así mismo se utilizó una solución de carboximetilcelulosa (CMC) de grado alimenticio al 3% para los 250 ml de la solución BUFFER.

$$\% \frac{P}{V} = \frac{g soluto}{ml solucion} * 100 \quad (1)$$

$$g soluto = \frac{3}{100} * 250 = 7.5 g CMC$$

Luego que se realizaron los cálculos, se obtuvo que se necesitó 0.596 g  $(NH_4)_2SO_4$  y 0.219 fosfato di ácido de potasio, para que se exista un medio de cultivo óptimo para la activación del hongo. Estos compuestos se los adicionó a la solución BUFFER, con la ayuda de una plancha de calentamiento y agitación magnética. Una vez que se diluyeron completamente los nutrientes en la solución, se calentó a una temperatura a 50°C. Cuando se llegó a esa temperatura se le añadieron los 7.5 g de CMC y se mezcla hasta que quede totalmente homogénea, se dejó enfriar hasta los 30°C, para poder adicionar el hongo *Trichoderma spp.* Para ello se calculó los gramos del hongo que contiene 5% de conidios.

$$\frac{1 \frac{g}{L} Trichoderma spp}{1L} * \frac{100\% Conidios}{5\% Conidios} = 20g Trichoderma spp$$

Se añadieron 20gr del hongo *Trichoderma spp* para la activación y se agitó para que se mezcle completamente con medio de cultivo. Una vez que se tuvo lista la muestra se sellaron los matracos con gasa y una liga para evitar posible contaminación, y se llevó a la incubadora con una plancha agitadora por 3-5 días a 120 rpm.

*Inoculación con polvo de raquis:* Al pasar los días de la activación del hongo, se procedió a preparar una solución de 750 ml Buffer (0.05 M citrato de sodio + ácido cítrico) con un pH 4.5, siguiendo los mismos pasos descritos anteriormente.

Solución de 750 ml de citrato de sodio  $Na_3C_6H_5O_7$  a 0.05M

$$\frac{258.06 g/mol}{1 mol Na_3C_6H_5O_7} * \frac{0.05 mol Na_3C_6H_5O_7}{1 L} * 0.75L = 9.667g Na_3C_6H_5O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M

$$\frac{192.12 \frac{g}{mol}}{1 mol C_6H_8O_7} * \frac{0.05 mol C_6H_8O_7}{1 L} * 0.1 L = 9.606g C_6H_8O_7$$

Solución de 100 ml de ácido cítrico C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> a 1 M

$$\frac{192.12 \frac{g}{mol}}{1 mol C_6H_8O_7} * \frac{1 mol C_6H_8O_7}{1 L} * 0.1 L = 19.212 g C_6H_8O_7$$

A la solución Buffer de 750 ml se añadió 50g de polvo de raquis y *Trichoderma spp* activada y se colocó en la plancha de agitación magnética para su homogenización, de esta manera se obtuvo un volumen total de 1000 ml de disolución. Luego de esto se trasvasó la disolución en 3 matraces Erlenmeyer para posteriormente llevarlo a la incubadora a 30°C con una plancha agitadora por 5 días a 120 rpm.

Al finalizar este tiempo se colocó la muestra (raquis inoculado) en un recipiente limpio y esterilizado con agua destilada para comenzar el proceso de lavado por medio de decantaciones hasta que el agua se tornó de un color translúcido, luego de esto dicha solución con el hongo *Trichoderma*, se sometió a alta temperatura (90°C) durante 10 min, para inactivar el hongo, posterior a esto se realizó un segundo lavado por medio de decantación, de igual forma se lo realizó hasta que el agua se tornó de un color translúcido. Finalmente se realizó una filtración quedando, así como resultado un remanente insoluble, el cual se lo llevo a una estufa para secarlo a 55°C por 24h, pasado este tiempo queda como resultado un remanente insoluble seco, listo para ser sometido al tratamiento químico.

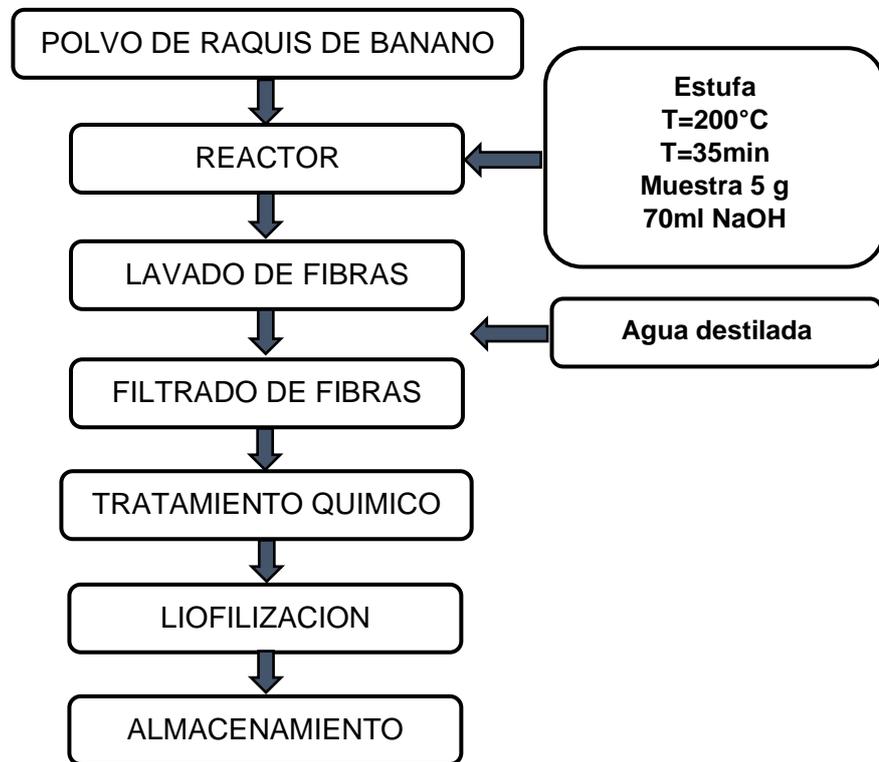
*Tratamiento químico:* Para comenzar con este tratamiento en un matraz Erlenmeyer se colocó 300ml de NaOH al 0.5M y 15 gr del remanente insoluble seco del tratamiento biológico, esto se sometió a agitación a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizaron lavados a la muestra hasta que llegó a un pH neutro.

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se acabó de obtener con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, esta mezcla se la dejó en agitación a 45°C por 14h. Una vez concluido el tiempo, se procedió a realizar el lavado hasta llegar a un pH neutro. A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y sometió a agitación a 80°C durante 2 h. De igual manera se lavó por decantación y filtración hasta que llegó a un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congelaron por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenó en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

2.7.2.3 Método 3 - Explosión de vapor y tratamiento químico (FQ). El procedimiento para realizar el método físico – químico se detalla a continuación:

Figura 8. Diagrama de Explosión de Vapor



Fuente: Autoría propia

Explosión de vapor: Se comenzó pesando 5 gr de polvo de raquis en un vaso de precipitación, a este se le añadieron 70 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 2%, para ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$\% \frac{P}{V} = \frac{g \text{ soluto}}{ml \text{ solucion}} * 100 \quad (3)$$

$$g \text{ soluto} = 5 g NaOH$$

Esto se mezcló hasta que se obtuvo una pasta homogénea, luego se trasvasó al recipiente propio del reactor y se cerró para luego llevarlo a la estufa con ventilación a una temperatura de 200°C<sup>38</sup> por 35min.

Una vez concluido este tiempo, se retiró al reactor de la estufa y se abrió la válvula para liberar la presión ejercida en el interior del mismo y se ejecutó la explosión de vapor. El producto de este proceso se encontró con humedad es por ello por lo que se realizaron

los cálculos en base húmeda de la muestra. Asumiendo que la muestra del polvo de raquis tenía contenido de humedad bajo, esta se la despreciaba. Entonces:

$$\text{masa de solido humedo} = \text{masa de humedad} + \text{masa de solido seco} \quad (4)$$

$$\text{masa de humedad} = 70.89 \text{ gr solución NaOH}$$

$$\text{masa de solido seco} = 5 \text{ gr polvo de raquis}$$

Reemplazando en la ecuación (4).

$$\text{masa de solido humedo} = 75.89 \text{ gr}$$

$$\frac{780 \text{ g masa sólido húmedo}}{5 \text{ g sólido seco}} * \frac{5 \text{ g sólido seco}}{1} = 227.27 \text{ g masa de sólido húmedo}$$

Entonces para tener 15 gr de muestra, necesarios para el siguiente proceso, se necesitó 227.27 gr de masa de solido húmedo que salen del reactor. Para obtener esta cantidad este proceso se realizó 5 veces para continuar con el siguiente método.

Una vez finalizado este proceso los 227.27 gr de muestra, se lavaron mediante decantación, luego se filtró y se lavó nuevamente hasta que llegó a un pH neutro, para luego pasar al siguiente método que es el proceso químico

Tratamiento químico: Para comenzar con este tratamiento en un matraz Erlenmeyer se colocó 300ml de NaOH al 0.5M y la muestra obtenida previamente del tratamiento explosión de vapor, con ayuda de una plancha de agitación y calentamiento, se colocó la muestra a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizaron lavados de la muestra hasta que llegó a pH neutro. <sup>61</sup>

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se acabó de obtener con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, y se la dejó en agitación a 45°C por 14h. Pasado el tiempo, se procedió a realizar el lavado hasta llegar a un pH neutro.

A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl a 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y se sometió a agitación a 80°C durante 2 h. De igual manera se lavó por decantación y filtración hasta que se alcanzó un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congelaron por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenaron en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

#### 2.7.2.4 Método 3 - Enriado biológico, Explosión de vapor y Tratamiento químico (BFQ).

Enriado biológico: Activación de *Trichoderma spp*: Se preparó una solución de 250 ml Buffer (citrato de sodio + ácido cítrico), para esto previamente se preparan las siguientes soluciones:

- 230 ml de citrato de sodio a 0.05M
- 100 ml de ácido cítrico a 0.5 M
- 100 ml de ácido cítrico a 0.75 M

A la solución de 230 ml Citrato de sodio se le adicionó de gota a gota el ácido cítrico, hasta alcanzar un pH 4.5, teniendo en cuenta no pasar el volumen de 250 ml.<sup>62</sup>

Luego se pesaron los compuestos que aportan los nutrientes (N,S,P) para el crecimiento del hongo: 0.596 g Sulfato de amonio y 0.219 fosfato di ácido de potasio. Y se los adiciona a la solución BUFFER, esto se mezcló con la ayuda de una plancha de calentamiento y agitación magnética. Una vez que se diluyeron completamente los nutrientes en la solución, se calentó la misma a una temperatura a 50°C.

Tan pronto como se haya alcanzado la temperatura de 50°C, se añadió los 7.5 gr CMC en la disolución y se mezcló hasta que quede totalmente homogénea. Dejar enfriar hasta llegar a 30°C, cuando llegue a esa temperatura se procedió a añadir 20gr del hongo *Trichoderma spp*, y se tapan los matraces con gasa para evitar posible contaminación. Luego se lleva a la incubadora con una plancha agitadora por 3-5 días a 120 rpm.

*Inoculación con polvo de raquis:* Al pasar los días de la activación del hongo, se procedió a hacer una solución de 750 ml Buffer con pH 4.5. A esta solución se le añadió los 50g de polvo de raquis y *trichoderma* activada a la solución buffer y homogenizar, de esta manera se obtuvo un volumen total de 1000 ml de disolución.

Luego se trasvasó la disolución en 3 matraces Erlenmeyer, y se los llevó a la incubadora con una plancha agitadora por 5 días a 120 rpm. Al finalizar este tiempo lavar y filtra. Del remanente previamente obtenido por la filtración se pesa 400 g y se sometió a un proceso de secado a 55°C por 24h, luego de este tiempo se obtiene 16 g de remanente seco biológico (RSB), esto se colocó en un recipiente hermético<sup>38</sup>, como resultado queda un remanente insoluble, listo para ser sometido al tratamiento de explosión de vapor.

Explosión de vapor: Siguiendo con el procedimiento para la extracción de la nanofibra por método BFQ, se pesó 5 g de RSB con 70 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 2%.

Una vez lista la muestra, se preparó el reactor hidrotérmico, se ingresó la muestra dentro del mismo y se cierra dicho reactor para luego llevarlo a la estufa con ventilación a una temperatura de 200°C por 35min. Una vez concluido este tiempo, se retiró el reactor de la estufa y se abrió la llave de paso del reactor, con esto se liberó la presión ejercida en el interior del mismo y se ejecutó la explosión de vapor.

Una vez finalizadas las extracciones, se pesan 227.27 g de muestra obtenidos el reactor, se lavó la muestra obtenida, mediante decantación, luego se filtró y se lavó nuevamente hasta llegar a un pH neutro para luego pasar al siguiente método que es el proceso químico.

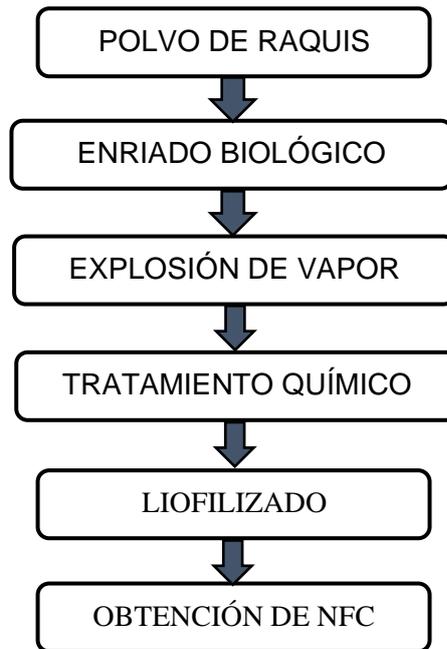
Tratamiento químico: Para continuar con el proceso se realizó el tratamiento alcalino, se preparó una solución de 300ml de NaOH al 0.5M, esta solución se la trasvasa a un matraz Erlenmeyer, y se le adicionó a la muestra de la explosión de vapor obtenida previamente, con ayuda de una plancha de agitación, se colocó la muestra a 30°C por 18h. Luego de esto, se realizó un proceso de lavado, por decantación y filtración hasta que la muestra llegue a pH neutro.<sup>61</sup>

Se continuó con el blanqueamiento, en un matraz Erlenmeyer se colocó la muestra que se obtuvo con 200ml de una solución binaria de NaOH 0.5 M y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 3%, y se dejó en agitación a 45°C por 14h. Una vez concluido el tiempo, se procedió a realizar el lavado mediante decantación y filtración hasta llegar a un pH neutro.

A continuación, se realizó el proceso de hidrólisis ácida, en una solución de 200 ml de HCl a 2 M, se sumergió el residuo insoluble obtenido y somete a agitación en una plancha de agitación y calentamiento a 80°C durante 2 h. De la misma manera se lavó y se decantó hasta que llegar a un pH neutro.

Finalmente, se colocaron las nanofibras en frascos y se congeló por 24 horas, para luego llevar las muestras a un proceso de liofilización por 40h, por último, se almacenaron en un recipiente ámbar para luego realizar los respectivos análisis.

Figura 9. Diagrama de Enriado Biológico



Fuente: Autoría propia

## 2.8 Caracterización del material

2.8.1 *Potencial de carga cero (pH<sub>pcc</sub>)*. Para la determinación del punto de carga cero, se pesó 0.1 g de cada una de las muestras NFC-Q (nanofibras de celulosa por método químico), NFC-BQ (nanofibras de celulosa por método biológico químico), NFC-FQ (nanofibras de celulosa por método físico químico) y NFC-BFQ (nanofibras de celulosa por método biológico físico químico). Simultáneamente se realizó una solución de 300 ml NaCl a 0.01M, con 0.1753 gr de NaCl.<sup>63</sup>

Una vez realizada la solución se trasvasó 50 ml en 6 vasos de precipitación, luego se ajustó el pH con soluciones diluidas de NaOH y HNO<sub>3</sub> en cada uno de los vasos, de modo que tengan diferente valor de pH inicial 2,4,6,8,10,12 respectivamente.<sup>55</sup>

Para finalizar se colocó 25 ml de cada en un tubo falcón de 50 ml con 0.1 g de muestra, al ser 2 repeticiones al final se obtendrán 12 tubos Falcon (2 tubos por cada solución de pH). Esto se lo lleva a la plancha de agitación por 24h a 120 rpm, al concluir este tiempo se volvió a tomar el pH (pH final) a cada uno de los tubos. Este mismo proceso se lo realizó con cada una de las muestras NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ

2.8.2 *Espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)*. Para la identificación de los diferentes grupos funcionales asociados a los múltiples componentes de las nanofibras de celulosa NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ, se empleó un espectrofotómetro de los laboratorios de la UTPL, con un rango de frecuencia entre 500 y 4000  $\text{cm}^{-1}$ .<sup>46,47,49-52</sup>

2.8.3 *Microscopía electrónica de barrido (MEB)*. Las micrografías de las nanofibras de celulosa se realizaron en los laboratorios de la ESPE con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido, con las cuales se puede observar la morfología de cada una de las muestras de nanofibras de celulosa de raquis de banano obtenidas por diferentes métodos (NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ y NFC-BFQ)

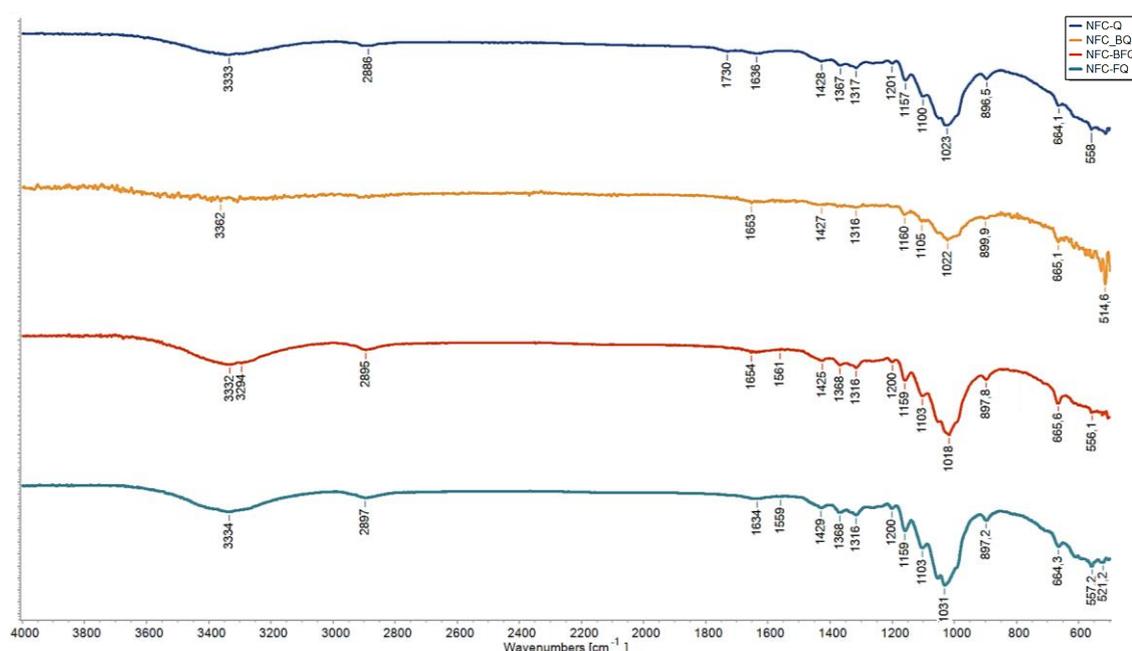
## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de las nanofibras de celulosa

3.1.1 *Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)*. Los espectros infrarrojos que se muestran a continuación muestran los diferentes grupos funcionales presentes en las nanofibras de celulosa, que fueron extraídas por 4 métodos (NFC-Q, NFC-BQ, NFC-FQ, NFC-BFQ).

Figura 10. Espectro FTIR de nanofibras de celulosa



Fuente: Autoría propia

El raquis de banana, que está compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta características distintivas en su espectro de FTIR. En la figura 10, se observan picos desde 3700 hasta 521  $\text{cm}^{-1}$ . Las vibraciones de estiramiento O-H y C-H, ubicadas entre 3700 y 2700  $\text{cm}^{-1}$ , son representativas de la celulosa y hemicelulosa. Específicamente, los picos alrededor de 2900 a 2700  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyen al estiramiento de C-H.<sup>46,47,49,51,52</sup>

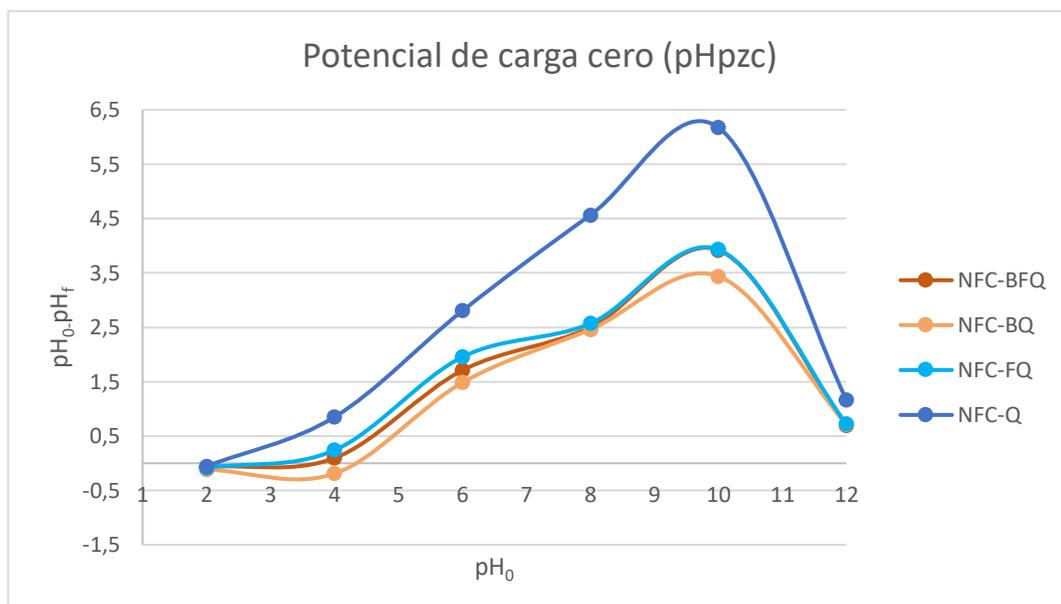
Los picos entre 1730 y 1626  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a las flexiones de los enlaces C=O y C=C, indicando la presencia de ácidos carboxílicos y lignina. La aparición de picos en el rango de 1428 a 1311  $\text{cm}^{-1}$  sugiere la presencia de estiramientos de CH<sub>2</sub>, característicos de la celulosa. Por su parte los picos que se muestran entre 1294 -1241

$\text{cm}^{-1}$  son estructuras de lignina que se presentan debido al estiramiento del  $\text{C}=\text{O}$ , mientras que los picos en la región de banda  $\sim 1034 \text{ cm}^{-1}$  está asociado a hemicelulosa no hidrolizadas que se encuentra fuertemente unidas a las microfibrillas de celulosa y  $\sim 1021 \text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de estiramiento  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ , componente de la celulosa. Además, los picos entre 896, 840 y  $582 - 521 \text{ cm}^{-1}$  se deben a los estiramientos de  $\text{C}-\text{H}$  y  $\text{C}-\text{OH}$ , confirmando la presencia de celulosa, lignina y grupos carboxilo (celulosa). Estas observaciones en el espectro FTIR reflejan la compleja composición química del raquis de banano.<sup>7,47,49,53,64</sup>

El FTIR NFC-BQ muestra una menor intensidad en el estiramiento dentro del rango de  $1600 \text{ cm}^{-1}$  a  $800 \text{ cm}^{-1}$ , en comparación con los otros métodos que exhiben un mayor estiramiento en este intervalo. Específicamente las NFC-FQ y NFC-Q presentan una mayor intensidad en los picos dentro de este rango, esto sugiere que los otros métodos presentan la mayor concentración de celulosa.

**3.1.2 Potencial de carga cero ( $\text{pH}_{\text{pcc}}$ ).** Esta prueba se realizó con la finalidad de indicar el punto de carga cero, es decir el punto donde la superficie de un material no tiene carga neta. Debido a que la carga superficial influye en la capacidad de adsorción del material. Además, se comparó los  $\text{pH}_{\text{pcc}}$  para cada una de nanofibras extraídas por diferentes métodos y evidenciar si existen o no diferencias significativas entre los mismos.

Figura 11. Potencial de carga cero de las nanofibras de celulosa como bioadsorbentes



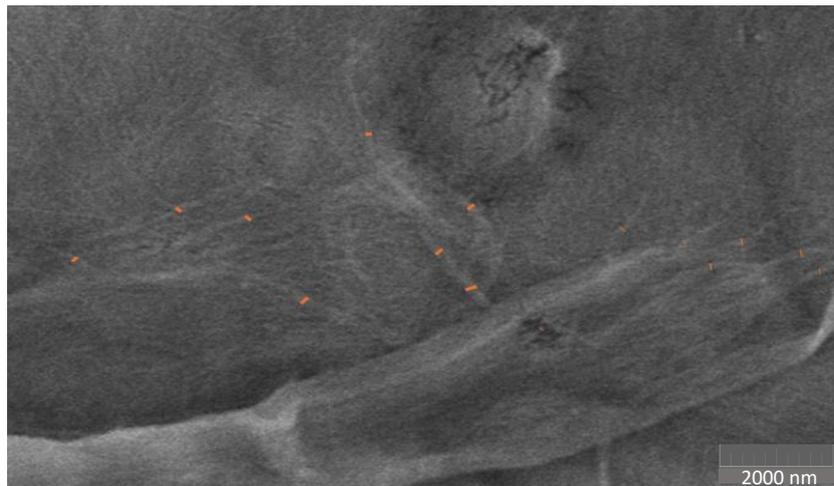
Fuente: Autoría propia

En la figura 11, se observa el comportamiento de las nanofibras de raquis de banano obtenidas por diferentes métodos de extracción, con respecto a las soluciones con distintos valores de pH (2,4,6,8,10,12), puestos en agitación a 120 rpm a 25°C.

El potencial de carga cero en la gráfica se identifica cuando curva intercepta en cero con el eje de la Y, es en este punto es donde se indica que la superficie del material no adsorbe ni desorbe protones. En base en lo mencionado el pH<sub>pcc</sub> para el material NFC-Q fue de 2.125, así mismo para NFC-FQ fue de 3.110, para NFC-BFQ fue de 3.730 y NFC-BQ fue de 4.34. Estos valores indican que si las superficies de las nanofibras de celulosa, trabajan a pH mayores a los valores de pH<sub>pcc</sub> mencionados, la superficie del material estaría cargado negativamente y por ende estaría absorbiendo protones, por el contrario, si trabajan a pH menores, la superficie del material estará cargado positivamente por el aumento de H<sup>+</sup> y por ende atrae aniones.<sup>56,65</sup>

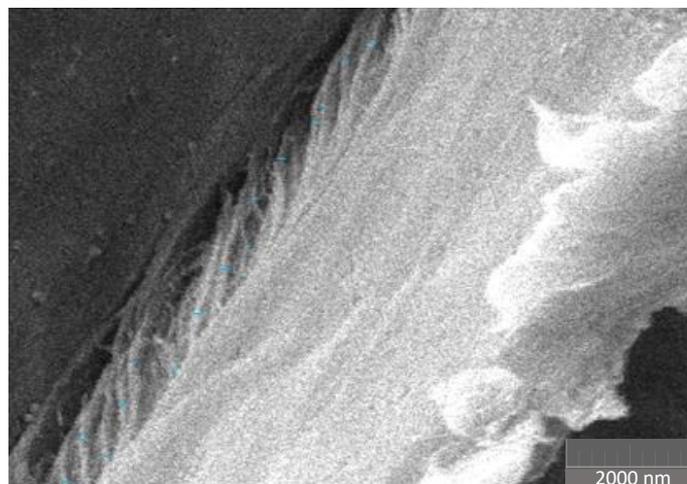
3.1.3 *Microscopía de Barrido (MEB)*. Las nanofibras de celulosa obtenidas por los métodos NFC-Q y NFC-BFQ presentan dimensiones en un rango de 32.99 nm a 96.91 nm y de 35.29 nm a 91.18 nm, respectivamente. Las nanofibras de celulosa obtenidas con el método NFC-Q muestran un menor rango de espesor, así mismo se puede observar que en este método se logran desprender una mayor cantidad de nanofibras y se muestra un campo más limpio. Por su parte, las nanofibras de NFC-FQ tienen un rango de 25.43 nm a 53.95 nm, mientras que las nanofibras de NFC-BQ poseen un rango de 32.18 nm a 53.64 nm. La variabilidad de tamaño indica la efectividad del método de extracción puesto que se aíslan las fibras a escala nanométrica debido a degradación de la lignina y la hemicelulosa, dado como resultado una mayor fibrilación, es decir se producen más nanofibras con menor dimensión.<sup>66,67</sup> Las NFC un gran potencial para aplicaciones industriales y una capacidad de producción adaptable, lo que contribuye a la viabilidad económica de estos procesos. Además, se puede corroborar que son nanofibras, puesto que se consideran así con un rango de 1 a 100nm.<sup>68</sup>

Figura 12. Micrografía SEM de NFC-Q de raquis de banano



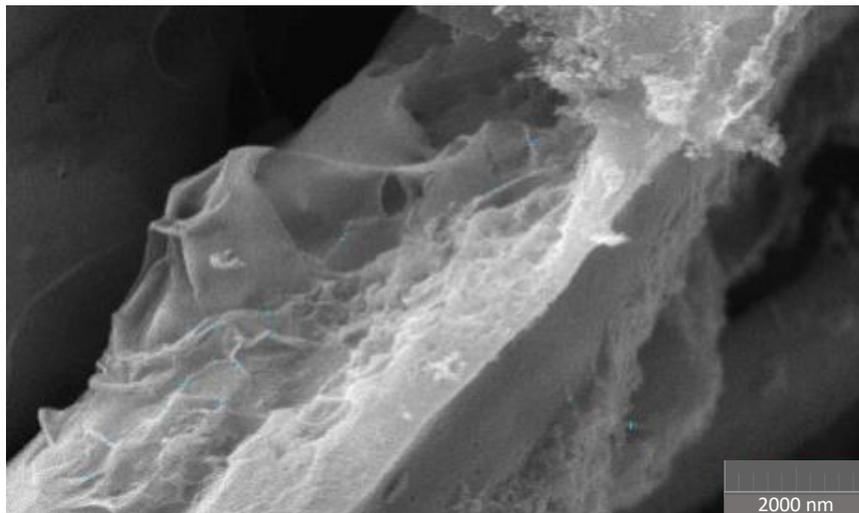
Fuente: Autoría propia

Figura 13. Micrografía SEM de NFC-BFQ de raquis de banano



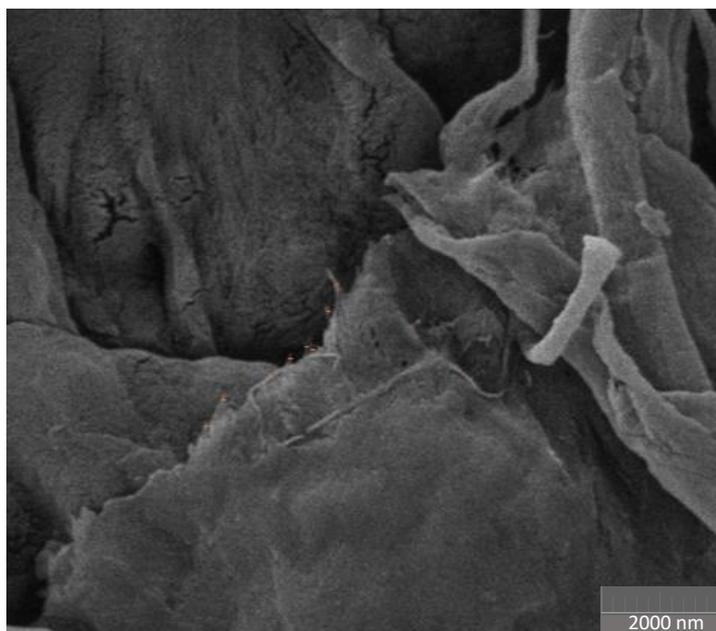
Fuente: Autoría propia

Figura 14. Micrografía SEM de NFC-BQ de raquis de banano



Fuente: Autoría propia

Figura 15. Micrografía SEM de NFC-FQ de raquis de banano



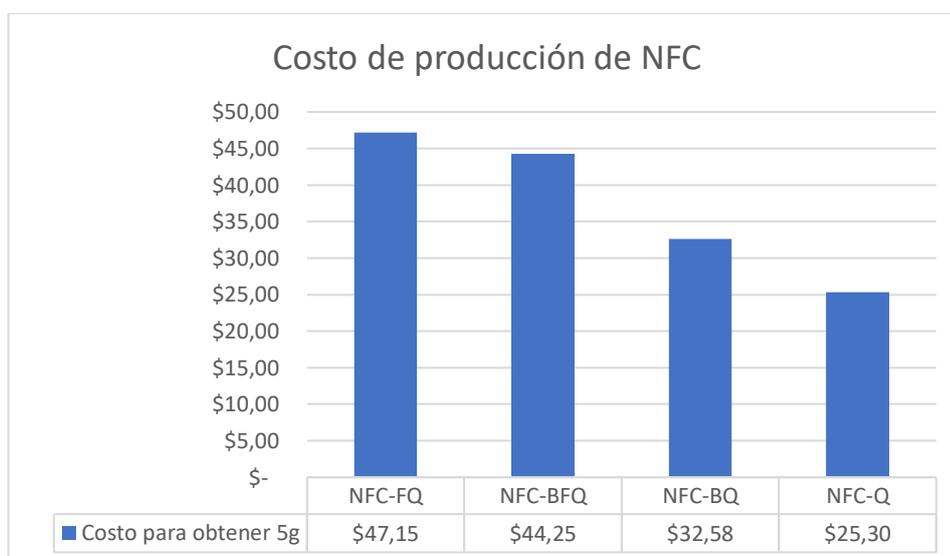
Fuente: Autoría propia

3.1.4 *Viabilidad Económica.* A continuación, se presenta una evaluación de la viabilidad económica de diferentes métodos para la producción de nanofibras de celulosa (NFC). La tabla 3.1.4 detalla los costos asociados a cada método, incluyendo materia prima, reactivos, consumo energético e insumos, proporcionando una visión general de los gastos totales para cada técnica evaluada.

Cuadro 1. Cuadro comparativo de costos de producción por cada uno de los métodos de extracción.

	NFC-Q	NFC-FQ	NFC-BQ	NFC-BFQ
Material obtenido (g)	3.50	2.65	5.40	5.03
Materia Prima	0.31	0.52	1.04	0.00
Reactivos	3.33	4.46	4.59	6.43
Consumo energético	2.09	2.89	11.52	12.31
Insumos	12.61	18.47	18.98	24.85
TOTAL	18.34	26.35	36.12	44.63
Fuente: Autoría propia				

Figura 16. Costos de producción para obtener 5 g de NFC por cada uno de métodos.



Fuente: Autoría propia

En el método químico es el tratamiento base para la obtención de la NFC, es por ello que en todas extracciones se lo realiza, mientras que los métodos biológicos y físicos actúan como pretratamiento para facilitar la despolimerización de la lignina, haciendo que salgan las fibras de celulosa.

El método químico tiene un costo de producción de \$25.30. En comparación, el método biológico-químico tiene un costo adicional de \$7.28, lo que representa un aumento del 28.8%. El método biológico-físico-químico tiene un costo adicional de \$18.95, lo que representa un aumento del 74.9%. El método físico-químico es el más caro, con un costo adicional de \$21.85, lo que representa un aumento del 86.4%.

Estos resultados muestran que el costo de producción aumenta significativamente cuando se incorporan métodos biológicos y/o físicos. Además, las pérdidas en el método físico-químico también contribuyen a su mayor costo.

## CONCLUSIONES

- Los métodos combinados de extracción pueden ofrecer ventajas en términos de pureza y características específicas de las nanofibras; sin embargo, el método químico resultó ser el más viable para la producción de NFC a gran escala debido a su menor costo relativos.
- Los resultados obtenidos por FTIR muestran que las nanofibras a las que se sometieron a un pretratamiento ya sea físico y/o biológico presentaron la menor concentración de lignina (rango de  $1600\text{ cm}^{-1}$  a  $800\text{ cm}^{-1}$ ), lo que indica un mayor grado de pureza. Además, se logra observar que al aplicar un pre tratamiento biológico como en las NFC-BQ y NFC-BFQ, los picos asociados a la lignina son menos prominentes, por lo cual se puede corroborar que la combinación de estos métodos genera una celulosa más limpia y de mejor pureza.
- El análisis mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró que las nanofibras de celulosa (NFC) obtenidas por el método biológico-físico-químico (NFC-BFQ) presentaron una morfología más uniforme y menos conglomerada, con menor presencia de impurezas, en comparación con las NFC obtenidas por otros métodos. Las NFC del método físico-químico (NFC-FQ) mostraron mayor variabilidad en el diámetro de las fibras. Estas observaciones sugieren que la elección del método de extracción afecta la calidad y uniformidad de las NFC, siendo el método biológico-físico
- -químico el más efectivo para obtener nanofibras de menor impureza.
- Las nanofibras extraídas por el método biológico-químico (NFC-BQ) con un pH<sub>pcc</sub> mayor son más adecuadas para aplicaciones en medios ácidos, mientras que las obtenidas por el método químico (NFC-Q) con un pH<sub>pcc</sub> más bajo son más efectivas en medios con pH menos ácido, lo que favorece la adsorción de cationes
- Finalmente, los métodos combinados pueden ofrecer ciertas ventajas en términos pureza y uniformidad de las NFC; sin embargo, son más costosos a gran escala. En tanto que, el método químico, aunque produce NFC con menor uniformidad y presencia de algunas impurezas, es significativamente más rentable para la producción a gran escala. Por lo tanto, la elección del método depende de las prioridades entre calidad de las NFC y viabilidad económica.

## RECOMENDACIONES

- Para llevar a cabo la extracción de NFC, combinado con método físico, se recomienda utilizar y/o diseñar un reactor de mayor tamaño, que reducirá las pérdidas de material durante el proceso y hará más eficiente la producción de NFC.
- Se recomienda continuar con la optimización del proceso químico para la obtención de nanofibras de celulosa, enfocándose en la reducción de costos sin comprometer la pureza de las nanofibras.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Peralta Holguin, W. E. Obtención de Nanocristales de Celulosa a Partir de Residuos Agrícolas. Trabajo de titulación, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, **2021**. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14619> (accessed 2024-03-02).
- (2) Borjas Ventura, R.; Julca Otiniano, A.; Alvarado Huamán, L. Las Fitohormonas Una Pieza Clave En El Desarrollo de La Agricultura. *Journal of the Selva Andina Biosphere* **2020**, 8 (2), 150–164.
- (3) Ministerio de agricultura y ganadería. *Panorama Agroestadístico*; **2023**. [http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama\\_estadistico/panorama\\_estadistico.pdf](http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/panorama_estadistico/panorama_estadistico.pdf) (accessed 2024-01-14).
- (4) Macay Anchundia, M. A.; Cedeño Moreira, A. A.; Zambrano Mendoza, M. E.; Intriago Vera, J. V. Uso de Raquis de Plátano (Musa AAB) Para La Producción de Ensilaje Como Estrategia de Economía Circular. *Ciencia Latina Internacional* **2023**, 7 (5), 4848–4862. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i5.8074](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8074).
- (5) Romero Sáez, M. Los Residuos Agroindustriales, Una Oportunidad Para La Economía Circular. *TecnoLógicas* **2022**, 25 (54), 1–4. <https://doi.org/https://doi.org/10.22430/22565337.2505>.
- (6) Caicedo, W.; Viáfara, D.; Pérez, M.; Alves Ferreira, F. N.; Rubio, G.; Yanza, R.; Caicedo, M.; Caicedo, L.; Valle, S.; Ferreira, W. M. Características Químicas Del Ensilado de Raquis de Plátano (Musa Paradisiaca) y Banano Orito (Musa Acuminata AA) Tratado Con Suero de Leche y Urea. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru* **2020**, 31 (4), 1–9.
- (7) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Martins, J. T.; Lanzoni, E. M.; Vicente, A. A.; Menegalli, F. C.; Cunha, R. L. Banana Starch Nanocomposite with Cellulose Nanofibers Isolated from banana Peel by Enzymatic Treatment: In Vitro Cytotoxicity Assessment. *Carbohydr Polym* **2019**, 207, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079>.
- (8) Vallejos, M. E.; Area, M. C. *Producción y Usos de La Celulosa Nanofibrilada Microfibrilada.*; Vallejos, M. E., Area, M. C., Eds.; 2019, 2019; Vol. II.
- (9) One Planet Network. *Economía Circular de los residuos orgánicos para la ciudad y el campo.* <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge->

centre/resources/economia-circular-de-los-residuos-organicos-para-la-ciudad-y-el-campo#:~:text=En%20el%20mundo%20se%20generan,a%C3%B1o%20son%20residuos%20org%C3%A1nicos%20biodegradables (accessed 2024-02-28).

- (10) Guerrero, A. B.; Aguado, P. L.; Sánchez, J.; Curt, M. D. GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. *Waste Biomass Valorization* **2016**, 7 (2), 405–415. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9455-3>.
- (11) Moreno Alarcon, B. A.; Zambrano Alvarado, F. D. Evaluación Del Aporte Nutricional de Un Fertilizante Obtenido a Partir de Residuos Orgánicos Para Su Aplicación En Fincas Bananeras., Universidad de Guayaquil, Guayaquil, **2023**. <https://repositorio.ug.edu.ec/items/1eabde1d-04d8-47ec-be26-77c12cbdb0a2> (accessed 2024-02-28).
- (12) Osorio, S.; Guerrero, C. *Aprovechamiento de Cáscara de Banano Para La Producción de Un Textil Aplicado a Productos de Exportación*; **2019**. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/45500/Proyecto%20de%20Grado%20-%20Aprovechamiento%20de%20c%C3%A1scara%20de%20banano.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accessed 2024-02-28).
- (13) Bustamante Torres, C. H. Determinación de Los Desechos Orgánicos Que Se Genera En El Proceso de Banano En Las Hcdas. “Italia y Clemencia” de La Frioport S.A En La Zona de Balao El Triunfo, Provincia Del Guayas., Universidad Agraria del Ecuador, GUAYAQUIL, **2015**. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BUSTAMANTE%20TORRES%20CARLOS%20HUGO.pdf> (accessed 2024-02-28).
- (14) Parra Reyes, J. A.; Pérez, E. H. Estimación de Materiales Lignocelulosicos Residuales Como Adsorbentes de Cromo y Plomo. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* **2022**, 21 (1), 18–27. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1610>.
- (15) Santiago, B.; Moreira, M. T.; Feijoo, G.; González-García, S. Environmental Comparison of Banana Waste Valorisation Strategies under a Biorefinery Approach. *Waste Management* **2022**, 142, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.005>.

- (16) Ahmad Khorairi, A. N. S.; Sofian-Seng, N. S.; Othaman, R.; Abdul Rahman, H.; Mohd Razali, N. S.; Lim, S. J.; Wan Mustapha, W. A. A Review on Agro-Industrial Waste as Cellulose and Nanocellulose Source and Their Potentials in Food Applications. *Food Reviews International* **2023**, *39* (2), 663–688. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478>.
- (17) Vargas Corredor, Y. A.; Pérez Pérez, L. I. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales Para El Mejoramiento de La Calidad Del Ambiente Use of Agro-Industrial. *Facultad de ciencias basicas* **2018**, *14* (1), 59–72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>.
- (18) Agurto Pérez, L.; Barreto Gálvez, L.; Biera Viera, M. Aprovechamiento Agroindustrial de Los Residuos de La Planta de Banano Para La Obtención de Productos Biodegradables En La Provincia de Sullana., Universidad Nacional de Piura, Piura, **2022**.
- (19) Salas V, M. *Reincorporación de residuos Orgánicos de cosecha al Suelo/Mulch*; Costa Rica, **2023**. <https://www.delcampoalplato.com/wp-content/uploads/2023/06/3.-Reincorporacion-de-residuos-organicos-de-cosecha-al-suelo.pdf> (accessed 2024-02-28).
- (20) Reyes Pallazhco, J. M.; Leon Cabrera, P.; Barrezueta Unda, S. Respuesta Del Cultivo de Banano a Diferentes Proporciones de Microorganismos y Biochar En Dos Texturas de Suelo. *Manglar* **2023**, *20* (2), 109–115. <https://doi.org/10.57188/manglar.2023.012>.
- (21) Vera Ruiz, K.; Mexa Aguilar Jorge. Efecto de La Aplicación de Raquis de Banano En La Composición Físquica-Química Del Suelo En Plantación de Banano “Musa Paradisiaca” En La Chanduy, Provincia Santa Elena., **2022**.
- (22) Chugchilan Baraja, G. O.; Zambrano Caisaguano, K. A. Producción de Humus de Lombriz Mediante El Aprovechamiento Del Raquis Del Orito (Musa Acuminata) En El Cantón La Maná Recinto San José Del Estero, Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión la Maná , La Maná, **2021**.
- (23) Jiménez Fallas, M.; Charpentier Alfaro, C.; Méndez Arias, J. *Aprovechamiento de Raquis de Banano Como Fuente de Carbono Para Producción de Celulosas*; **2019**. <https://jornadas.fing.ucr.ac.cr/documentos/Ponencia/2019/Aprovechamiento-de->

raquis-de-banano-como-fuente-de-carbono-para-produccion-de-celulosas.pdf  
(accessed 2024-01-14).

- (24) Suárez Forero, S. J.; Candela Soto, A. M.; Henao Martínez, J. A.; Bayona Ayala, O. L. Evaluación Del Desempeño Del Pretratamiento Con Peróxido de Hidrógeno Sobre Bagazo de Caña de Azúcar Para Remoción de Lignina. *ITECKNE* **2019**, *16* (1), 21–28. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2158>.
- (25) Zela Ventura, L. Potencial Uso Del Material Lignocelulosico de Tayanca (Baccharis Microphylla) Para Obtener Etanol, Abancay-Perú, **2022**. <http://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1198> (accessed 2024-02-28).
- (26) Jiménez Endara, P. A. Obtención de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina a Partir de Los Residuos de La Planta de Tomate, Mediante Una Metodología Experimental, Para El Desarrollo de Biopelículas., Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga, **2023**. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/37070> (accessed 2024-03-02).
- (27) Ouarhim, W.; Zari, N.; Bouhfid, R.; Qaiss, A. E. K. Mechanical Performance of Natural Fibers-Based Thermosetting Composites. In *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*; Elsevier, **2018**; pp 43–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5>.
- (28) 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. Obtención de Nanocelulosa a Partir de Residuos Postcosecha. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología* **2021**, *16* (30), 1–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69662>.
- (29) Mohd Zaini, H.; Saallah, S.; Roslan, J.; Sulaiman, S.; Munsu, E.; Wahab, N. A.; Pindi, W. Banana Biomass Waste: A Prospective Nanocellulose Source and Its Potential Application in Food Industry – A Review. *Heliyon* **2023**, *9*, e18734. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18734>.
- (30) Gorgieva, S.; Trček, J. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications. *Nanomaterials* **2019**, *Vol. 9*, Page 1352 **2019**, *9* (10), 1352. <https://doi.org/10.3390/NANO9101352>.
- (31) Muhammad Awais, N.; Siddiqui, Q.; Mushtaq, M.; Farooq, A.; Pang, Z.; Wei, Q. In situ Self-Assembly of Bacterial Cellulose on Banana Fibers Extracted from

- Peels. *Journal of Natural Fibers* **2019**, 17 (9), 1–12.  
<https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1563580>.
- (32) Espinosa, E. V. *Lignonnanofibras de Celulosa (Lnfc) a Partir de Residuos Agro-Industriales No Madereros. Obtención, Caracterización y Aplicaciones.*; Córdoba, **2019**. <https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>.
- (33) Borja Muñoz, B. Síntesis y Caracterización de nanocelulosas de Orígenes Diversos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Barcelona, **2018**. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/120299?locale-attribute=es> (accessed 2024-03-03).
- (34) Pinto, E.; Aggrey, W. N.; Boakye, P.; Amenuvor, G.; Sokama-Neuyam, Y. A.; Fokuo, M. K.; Karimaie, H.; Sarkodie, K.; Adenutsi, C. D.; Erzuah, S.; Rockson, M. A. D. Cellulose Processing from Biomass and Its Derivatization into Carboxymethylcellulose: A Review. *Scientific African, journal homepage: www.elsevier.com/locate/sciaf* **2022**, 15, e01078.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2021.E01078>.
- (35) Morales De La Rosa, S. *Hidrolisis Ácida de Celulosa y Biomasa Lignocelulósica Asistida Con Líquidos Iónicos*; Madrid, 2015. <http://hdl.handle.net/10261/132717> (accessed 2024-07-28).
- (36) Galarza Esparza Ricardo Sebastián, M. D. J. I. *Obtención de nanocelulosa mediante la hidrólisis ácida de la cáscara de solanum tuberosum*; Riobamba, **2021**. <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/15445> (accessed 2024-07-28).
- (37) Sarker, T. R.; Pattnaik, F.; Nanda, S.; Dalai, A. K.; Meda, V.; Naik, S. Hydrothermal Pretreatment Technologies for Lignocellulosic Biomass: A Review of Steam Explosion and Subcritical Water Hydrolysis. *Chemosphere* **2021**, 284. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>.
- (38) Solano Martínez, M. G. Optimización Del Proceso de Hidrólisis Enzimática Parcial (Acellerase ®1500) Para La Obtención de Nanofibras de Celulosa a Partir Del Raquis de Plátano Macho (Musa Paradisiaca L.), Universidad del Papaloapan, Oaxaca, **2018**.
- (39) Solano Martínez, C. E.; María, A.; Amaya, C.; Andrés, E.; Méndez, M.; Andrés, S.; Charles, R.; Zambrano Herreño, E. *Propuesta de Aprovechamiento de Vástago de Plátano Para La Elaboración de Artesanías y Textiles Director*,

- Colombia, 2023. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/4e656b17-f18b-465c-946f-6390e7b6de67> (accessed 2024-02-28).
- (40) Vázquez, M. A.; Cabrera, E. C. V.; Torta, L.; Laudicina, A.; Sardina, M. T.; Mirabile, G. Potencialidades Del Consorcio Microbiano *Curvularia Kusanoi* - *Trichoderma Pleuroticola* Como Pretratamiento Biológico Para La Degradación de Fuentes Fibrosas. *Rev MVZ Cordoba* **2022**, 27 (2), 1–11. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2559>.
- (41) González Reyes, A. I. Pretratamiento Químico-Enzimático de Pulpa Kraft de Eucalipto Para La Producción de Nanocelulosa Fosforilada., Universidad de Concepción, Concepción, **2023**.
- (42) Phother-Simon, J.; Hanif, I.; Liske, J.; Jonsson, T. The Influence of a KCl-Rich Environment on the Corrosion Attack of 304 L: 3D FIB/SEM and TEM Investigations. *Corros Sci* **2021**, 183, 109315. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2021.109315>.
- (43) Alfaro Flores, S. R.; Álvarez Quiroz, M. B.; Asato Cerna, J. E.; González Vásquez, J. A. Nanopartículas de Celulosa: Revisión Sistemática. *Gestión de Operaciones Industriales* **2023**, 2 (02), 8–20. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2023.06>.
- (44) López Sosa, L. B.; Aguilera Mandujano, A.; Morales Máximo, M. *Caracterización Físicoquímica En Recursos Másicos.*; **2023**.
- (45) Presenda-Gerónimo, A.; Bolio-López, G. I.; Azamar- Barrios, V. L.; Ramírez-Casillas, J. A.; Sarracino-Martínez, O.; Hernández-Villegas, M. M.; De la Cruz-Burelo, P. Obtención de Celulosa a Partir de Residuos de Piña (*Ananas Comosus* L. Merrill). *Agro Productividad* **2020**, 13 (2), 77–82. <https://doi.org/10.32854/AGROP.VI.1608>.
- (46) Merais Mohammad Sobri, K. N. S. M. H. M. S. M. B. L. P. C. W. S. Preparation and Characterization of Cellulose Nanofibers from Banana Pseudostem by Acid Hydrolysis: Physico-Chemical and Thermal Properties. *Membranes (Basel)* **2022**, 12 (5). <https://doi.org/10.3390/membranes12050451>.
- (47) García-Ramón, J. A.; Carmona-García, R.; Valera-Zaragoza, M.; Aparicio-Saguilán, A.; Bello-Pérez, L. A.; Aguirre-Cruz, A.; Alvarez-Ramirez, J. Morphological, Barrier, and Mechanical Properties of Banana Starch Films Reinforced with Cellulose Nanoparticles from Plantain Rachis. *Int J Biol Macromol* **2021**, 187, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>.

- (48) Sumarago, E. C.; dela Cerna, M. F. M.; Leyson, A. K. B.; Tan, N. P. B.; Magsico, K. F. Production and Characterization of Nanocellulose from Maguey (Agave Cantala) Fiber. *Polymers (Basel)* **2024**, *16* (10). <https://doi.org/10.3390/polym16101312>.
- (49) Md Salim, R.; Asik, J.; Sarjadi, M. S. Chemical Functional Groups of Extractives, Cellulose and Lignin Extracted from Native *Leucaena Leucocephala* Bark. *Wood Sci Technol* **2021**, *55* (2), 295–313. <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2>.
- (50) Jiang Fan, C. G. L. Z. A. M. D. X. H. J. J. M. W. L. Y. The HSP/Co-Chaperone Network in Environmental Cold Adaptation of *Chilo Suppressalis*. *Int J Biol Macromol* **2021**, *187*, 780–788. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.113>.
- (51) Paladini Giuseppe, V. V. C. V. M. D. F. A. P. C. 2D Correlation Spectroscopy (2DCoS) Analysis of Temperature-Dependent FTIR-ATR Spectra in Branched Polyethyleneimine/TEMPO-Oxidized Cellulose Nano-Fiber Xerogels. *Polymers (Basel)* **2021**, *13* (4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/polym13040528>.
- (52) Kumari Priyanka, P. G. G. R. S. D. M. A. Cellulose Nanofibers from Lignocellulosic Biomass of Lemongrass Using Enzymatic Hydrolysis: Characterization and Cytotoxicity Assessment. *DARU, Journal of Pharmaceutical Sciences* **2019**, *27* (2), 683–693. <https://doi.org/10.1007/s40199-019-00303-1>.
- (53) Moosavinejad Seyed Mahdi, M. M. V. M. R. D. Evaluation of Degradation in Chemical Compounds of Wood in Historical Buildings Using Ft-Ir And Ft-Raman Vibrational Spectroscopy. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* **2019**, *21* (3), 381–392. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000310>.
- (54) Le Jiabo, I. M. C. A. C. J. Determining Potentials of Zero Charge of Metal Electrodes versus the Standard Hydrogen Electrode from Density-Functional-Theory-Based Molecular Dynamics. *Phys Rev Lett* **2017**, *119* (1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.016801>.
- (55) Amaringo Villa Fredy Alberto, H. A. A. Determination of the Point of Zero Charge and Isoelectric Point of Two Agricultural Wastes and Their Application in the Removal of Colorants. *Dialnet* **2017**.
- (56) Albis Arrieta Alberto, L. R. H. G. G. J. G. M. D. Adsorción de Azul de Metileno Utilizando Cáscara de Yuca (*Manihot Esculenta*) Modificada Químicamente Con Ácido Oxálico. *Revista ION* **2019**, *31* (2), 99–110. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018007>.

- (57) Pineda Ayala David Moisés, D. H. J. E. Evaluation of Oil Palm Empty Fruit Bunch Wastes as Adsorbent for the Removal of Reactive Dyes from Aqueous Solutions. *Ingeniería Investigación y Tecnología* **2019**, 20 (1), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n1.008>.
- (58) Rodríguez Guzmán Daniel Paul. Gestión de Servicios Enfocados a OPEX En Lugar de CAPEX. *Trabajo de Titulación* **2023**.
- (59) Horacio Lazarte A. *Análisis de costos, break-even y perspectivas de la oferta de gas natural en argentina maestría interdisciplinaria en energía*; **2020**.
- (60) Mindiolaza Alvarado Gilbert Joel. *Obtención de Harina de Banano Como Componente En El Desarrollo de Un Suplemento Alimenticio*; Guayaquil, **2020**.
- (61) Zuluaga, R.; Putaux, J. L.; Cruz, J.; Vélez, J.; Mondragon, I.; Gañán, P. Cellulose Microfibrils from Banana Rachis: Effect of Alkaline Treatments on Structural and Morphological Features. *Carbohydr Polym* **2009**, 76 (1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.024>.
- (62) Campos Chacán Stefanía Jazmín, T. Q. A. L. P. A. B. G. S. I. M. *Evaluación de Dos Metodologías de La Extracción de La Fibra Del (Cannabis Sativa L)*; 2022.
- (63) Zein Rahmiana; Akmal Clalitya; Safni Safni; Fauzia Syiffa; Ramadhani Putri. Banana Stem (Musa Balbisiana Colla) as Potential Biosorbent to Remove Methylene Blue Dye in Wastewater: Isotherm, Kinetic, Thermodynamic Studies and Its Application. *Applied Environmental Research* **2023**, 45 (3). <https://doi.org/10.35762/AER.2023015>.
- (64) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Menegalli, F. C. Cellulose Nanofibers Produced from Banana Peel by Chemical and Enzymatic Treatment. *LWT* **2014**, 59 (2P2), 1311–1318. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.011>.
- (65) O Afolabi, F.; Musonge, P.; F Bakare, B. Bio-Sorption of Copper and Lead Ions in Single and Binary Systems onto Banana Peels. *Cogent Eng* **2021**, 8 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1886730>.
- (66) Kumar, R.; Kumari, S.; Surah, S. S.; Rai, B.; Kumar, R.; Sirohi, S.; Kumar, G. A Simple Approach for the Isolation of Cellulose Nanofibers from Banana Fibers. *Mater Res Express* **2019**, 6 (10). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3511>.
- (67) Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Martins, J. T.; Vicente, A. A.; Menegalli, F. C. Cellulose Nanofibers Produced from Banana Peel by Chemical and Mechanical Treatments:

Characterization and Cytotoxicity Assessment. *Food Hydrocoll* **2018**, *75*, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.027>.

- (68) Chinga Carrasco Gary. Cellulose Fibres, Nanofibrils and Microfibrils: The Morphological Sequence of MFC Components from a Plant Physiology and Fibre Technology Point of View. *Nanoscale Res Lett* **2011**, *6*, 1–7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-417>.

## ANEXOS

### Anexo A. Preparación de la muestra



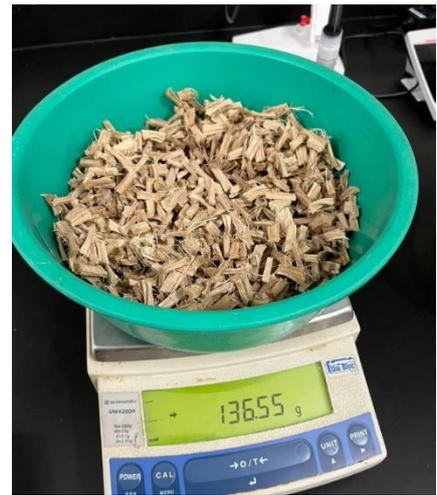
### Anexo B. Pelado del raquis



### Anexo C. Troceado y lavado del raquis de banano



#### Anexo D. Secado de raquis



#### Anexo E. Trituración y tamizado del raquis particulado



#### Anexo F. Enriado biológico – inoculación del raquis de banano con *trichoderma spp*



### Anexo G. Explosión de Vapor



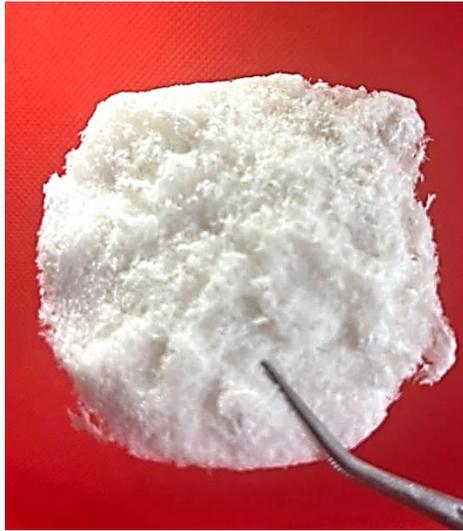
### Anexo H. Tratamiento químico



### Anexo I. NFC- BQ



**Anexo J. NFC- BFQ**



**Anexo J. NFC-FQ**

