



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS**

**AISLAMIENTO DE NANOFIBRILLAS DE CELULOSA A PARTIR DE
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS AGRÍCOLAS PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIOMATERIALES QUE PUEDAN SUSTITUIR A
LAS FIBRAS SINTÉTICAS**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

ELSA ALEXANDRA GALEANA OLVERA

TUTORA PRINCIPAL:

**DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

COMITÉ TUTOR:

**M.A.I. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS
FACULTAD DE QUÍMICA**

**DRA. IDANIA VALDEZ VAZQUEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, DICIEMBRE 2017

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Idania Valdez Vazquez

Secretario: Dra. Georgina Fernández Villagómez

Vocal: M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios

1^{er} suplente: M. A. I. Landy Irene Ramírez Burgos

2^{do} suplente: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar donde se realizó la tesis: Coordinación de Ingeniería Ambiental, edificio 5 del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Firma

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental que cuenta con certificación de la calidad ISO 9001:2008 otorgada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C. (IMNC) con registro RSGC 960 de fecha 11 de enero de 2016, vigente al 11 de enero de 2019.

También se realizaron pruebas en el Centro de Innovación en Diseño y Tecnología (CIDyT) del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, ubicado en el Parque de Investigación e Innovación Tecnológica (PIIT) de Monterrey, Nuevo León.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por permitirme hacer realidad mis sueños y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad.

Gracias a mis padres, Tere y Víctor, por ser los principales promotores de mis sueños. Gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí. Gracias a mi madre por escucharme y motivarme cada vez que sentí desfallecer en el camino. Gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mí, por cada consejo y por cada una de sus palabras que me han guiado durante mi vida.

A mis hermanas, Karen y Marieli, por ser la razón para que quiera superarme día con día y ser el mejor ejemplo a seguir para ellas, son una parte importante de mi vida y han llenado mi vida de amor y alegría.

A mi persona especial, Mauro, por ser una parte muy importante de mi vida, por apoyarme en las buenas y en las malas, sobre todo por su paciencia.

Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis profesores y compañeros, por haber compartido conmigo sus conocimientos.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.

RECONOCIMIENTOS

De manera especial:

- Dra. María Neftalí Rojas Valencia, le agradezco por el apoyo que me brindó a lo largo de la maestría y las recomendaciones que me permitieron concluir con el presente trabajo y mi realización profesional.

De igual manera a mi jurado de examen de grado que con sus comentarios y consejos me permitieron crecer como profesional y consolidar de manera satisfactoria el trabajo aquí presente:

- M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos, por sus consejos y recomendaciones a lo largo de todo el trabajo de tesis.
- Dra. Idania Valdez Vázquez, por todas sus recomendaciones y observaciones con respecto a este trabajo, que permitieron mejorarlo continuamente.
- M. C. Constantino Palacios Gutiérrez, por sus puntuales observaciones que permitieron mejorarlos en diferentes aspectos.
- Dra. Georgina Fernández Villagómez, por aportar su experiencia y tiempo en la revisión de este trabajo.

Dr. Christian Mendoza Buenrostro, por su apoyo y ayuda en la producción del hilo mediante electrospinning en el CIDyT, Campus PIIT Monterrey.

A mis compañeros que me apoyaron en el estudio de generación de residuos en la central de abasto de la Ciudad de México y en la obtención de las nanofibrillas a partir de residuos de coco y de plátano: Denisse Cisneros, Irene Licea y Karina Peñaloza.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme la beca a partir de la cual pude realizar mis estudios de maestría.

Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas y permitirme ampliar y enriquecer mi formación académica y profesional.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	16
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Justificación.....	18
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Alcances.....	20
CAPÍTULO 2. MARCO LEGAL Y TEÓRICO.....	21
2.1 Normativa.....	21
2.2 Residuos agrícolas.....	22
2.3 Manejo de los residuos agrícolas en México.....	23
2.3.1 Quema de residuos agrícolas en México.....	23
2.4 Producción agrícola en México.....	25
2.5 Producción de coco y plátano en México.....	26
2.6 Cosecha de coco.....	26
2.6.1 Variedades del cocotero.....	28
2.6.2 Ficha técnica de industrialización de coco.....	30
2.6.3 Usos alternativos de los residuos agrícolas de coco.....	31
2.7 Cosecha de plátano.....	32

2.7.1 Variedades del plátano.....	33
2.7.2 Usos alternativos de los residuos agrícolas de plátano.....	33
2.8 Celulosa.....	37
2.8.1 Desarrollo de la celulosa.....	39
2.8.2 La celulosa: el polisacárido más abundante en la naturaleza.....	42
2.8.3 La celulosa y la industria.....	42
2.9 Nanotecnología.....	43
2.9.1 Propiedades y comportamientos que ocurren en la nanoescala.....	44
2.10 Nanocelulosa.....	46
2.11 Nanocompuestos.....	47
2.12 Electrospinning.....	48
2.12.1 Historia del electrospinning.....	50
2.13 Forcespinning.....	51
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES.....	53
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	59
4.1 Fase I. Estudio de gabinete	59
4.2 Fase II. Trabajo en campo.....	60
4.3 Fase III. Experimentación.....	60
4.3.1 Análisis morfológico de los residuos.....	60

4.3.2 Obtención de nanofibrillas de coco.....	61
4.3.3 Obtención de nanofibrillas de plátano.....	63
4.3.4 Caracterización de las nanofibrillas obtenidas.....	65
4.3.5 Producción de hilo.....	65
4.3.6 Evaluación de factibilidad técnica-económica y ambiental.....	66
4.3.6.1 Evaluación técnica.....	67
4.3.6.2 Evaluación económica.....	68
4.3.6.3 Evaluación ambiental.....	68
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	69
5.1 Generación de residuos sólidos orgánicos de plátano y coco.....	69
5.2 Reúsos alternativos de los RSO de plátano y coco.....	70
5.3 Muestreo.....	71
5.4 Análisis de los residuos de plátano y coco y obtención de nanofibrillas.....	73
5.4.1 Análisis de los residuos.....	73
5.4.1.1 Análisis de fracciones de la fibra.....	73
5.4.1.2 Análisis de química proximal.....	74
5.4.2 Obtención de nanofibrillas de plátano.....	75
5.4.3 Obtención de nanofibrillas de coco.....	78
5.5 Caracterización de las nanofibrillas obtenidas.....	78

5.6 Producción de fibras mediante electrospinning.....	82
5.7 Estudio de factibilidad técnica-económica y ambiental.....	93
5.7.1 Factibilidad técnica.....	93
5.7.2 Factibilidad económica.....	95
5.7.3 Factibilidad ambiental.....	102
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	107
CAPÍTULO 7. RECOMENDACIONES.....	109
CAPÍTULO 8. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS.....	110
CAPÍTULO 9. REFERENCIAS.....	112
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RECONOCIMIENTOS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	XV

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Normatividad en materia de textiles.....	21
Tabla 2.2 Normatividad en materia de residuos.....	22
Tabla 2.3 Año agrícola octubre 2013 – septiembre 2014.....	25
Tabla 2.4 Cierre de producción agrícola.....	26
Tabla 5.1 Fracciones de la fibra de plátano.....	73
Tabla 5.2 Fracciones de la fibra de coco.....	73
Tabla 5.3 Resultados de química proximal de residuos de plátano.....	74
Tabla 5.4 Resultados de química proximal de residuos de coco.....	75
Tabla 5.5 Soluciones de plátano en electrospinning.....	83
Tabla 5.6 Soluciones de plátano en forcespinning.....	84
Tabla 5.7 Soluciones de coco en electrospinning y forcespinning.....	85
Tabla 5.8 Soluciones de plátano y PCL/Acetona en electrospinning.....	86
Tabla 5.9 Soluciones de coco y PCL/Acetona en electrospinning.....	87
Tabla 5.10 Grosor de hilo.....	94
Tabla 5.11 Peso del hilo.....	95
Tabla 5.12 Resultados de tiempo invertido.....	96
Tabla 5.13 Costos en obtención de nanofibrillas de plátano.....	97

Tabla 5.14 Costos en obtención de nanofibrillas de coco.....	99
Tabla 5.15 Gastos en electrospinning.....	101
Tabla 5.16 Residuos generados.....	103
Tabla 5.17 Energía utilizada.....	104
Tabla 5.18 Resumen de factores económicos y ambientales.....	105
Tabla 5.19 Resumen de factores jerarquizado.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Estructura de la celulosa.....	39
Figura 2.2 Estructura de la pared celular de la célula vegetal.....	39
Figura 2.3 Esquema general de la disposición de electrospinning.....	49
Figura 2.4 Esquema general de la disposición de forcespinning.....	52
Figura 4.1 Diagrama de la metodología.....	59
Figura 4.2 Método para la obtención de nanofibrillas de residuos de coco.....	63
Figura 4.3 Método para la obtención de nanofibrillas de residuos de plátano.....	65
Figura 4.4 Parámetros de la evaluación de factibilidad del estudio.....	66
Figura 4.5 Huso para hilar.....	67
Figura 5.1 Residuos generados del cultivo de plátano.....	69
Figura 5.2 Residuos generados del cultivo de coco.....	70
Figura 5.3 Reúsos alternativos de los residuos de coco y plátano.....	71
Figura 5.4 Método de cuarteo para estudio de generación de residuos de plátano.....	72
Figura 5.5 Método de cuarteo para estudio de generación de residuos de coco.....	72
Figura 5.6 Pinzote en secciones de 30 cm.....	76

Figura 5.7 Fibras de plátano en proceso de secado.....	76
Figura 5.8 Licor negro.....	77
Figura 5.9 Celulosa de plátano.....	77
Figura 5.10 Celulosa de pinzote de plátano centrifugada y seca.....	78
Figura 5.11 Fibra de coco seca.....	78
Figura 5.12 Fibra de coco obtenida después de la hidrólisis ácida.....	79
Figura 5.13 Fibra de coco después de dializar por 3 días.....	79
Figura 5.14 NFC Plátano I.....	80
Figura 5.15 NFC Plátano II.....	80
Figura 5.16 NFC Plátano III.....	81
Figura 5.17 NFC Coco.....	81
Figura 5.18 Fibra obtenida mediante electrospinning de solución plátano- PCL/Acetona.....	88
Figura 5.19 Fibras electrohiladas de PCL/Acetona.....	89
Figura 5.20 Fibras electrohiladas de coco al 14% y PCL/Acetona al 99%.....	90
Figura 5.21 Fibras electrohiladas de coco al 16% y PCL/Acetona al 99%.....	90
Figura 5.22 Fibras electrohiladas de plátano al 12% y PCL/Acetona al 99%.....	91
Figura 5.23 Fibras electrohiladas de plátano al 14% y PCL/Acetona al 99%.....	92
Figura 5.24 Fibras electrohiladas de plátano al 16% y PCL/Acetona al 99%.....	92

Figura 5.25 Fibra de plátano 1%-16% hilada.....	93
Figura 5.26 Fibra de plátano 1%-14% hilada.....	94
Figura 5.27 Tiempo invertido.....	96
Figura 5.28 Costos directos en la obtención de nanofibrillas de plátano.....	98
Figura 5.29 Costos directos en la obtención de nanofibrillas de coco.....	100
Figura 5.30 Costos directos en electrospinning.....	101
Figura 5.31 Costos directos de procesos.....	102
Figura 5.32 Residuos de los procesos.....	103
Figura 5.33 Energía requerida para los procesos.....	105
Figura 5.34 Jerarquización de los procesos.....	106

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

SAGARPA.- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

INNTEX.- Instituto Nacional de Normalización Textil.

SEMARNAT.- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CCA. - Comisión para la cooperación ambiental.

PS. - Partículas Suspendidas.

HAP.- Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

INEGI.- Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

NFC.- Nanofibrillas de Celulosa.

CNC.- Nanocristales de Celulosa.

FECYT.- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

NDF.- Fibra neutro detergente.

ADF.- Fibra ácido detergente.

EMIM-Ac.- Acetato de 1-etil-3-metiliimidazolio

DMF.- N, N-Dimetilformamida

PCL.- Policaprolactona

RESÚMEN

La industria agrícola es una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos en la República Mexicana; en la industria del plátano se produce gran cantidad de residuos, ya que de la planta solo se aprovecha el fruto. En el caso del coco, sus residuos se generan como un subproducto de las actividades comerciales, industriales o agrícolas.

El objetivo del presente trabajo fue obtener las nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de pinzote de plátano y fibra de coco, elaborando con ellas biomateriales que sustituyan a las fibras sintéticas en textiles.

La metodología utilizada se dividió en dos fases: la primera se realizó el estudio de generación y muestreo en la central de abasto de la Ciudad de México, basándose en la normativa NMX-AA-15-1985. En la segunda se trabajó para obtener las nanofibrillas de celulosa mediante método químico con NaOH. Las nanofibrillas obtenidas se disolvieron en acetato de 1-etil-3-metilimidazolio y N, N-dimetilformamida; posteriormente mezclándose con PCL/acetona e introduciéndose en un equipo de electrospinning para obtener hilo.

El estudio de generación demostró que en la central de abasto se generan hasta 6 toneladas diarias de residuos de pinzote de plátano y de 250 a 300 kg diarios de residuos de fibra de coco.

En cuanto a la elaboración del hilo mediante electrospinning se mostraron mejores resultados de disolución en el 16% de peso de material. Se obtuvo el hilo a partir de un flujo de 5 mL/s, un voltaje de 18 Kv y distancia del colector de 20 cm.

1. INTRODUCCIÓN

Existen cerca de 200 productos agrícolas que se cultivan en México, destacando algunos que son de importancia porque se destinan al consumo directo y otros porque se canalizan al mercado exterior con la consecuente generación de divisas para el país. Las actividades agrícolas generan una gran cantidad de subproductos y desechos, de los cuales solamente algunos tienen un uso definido. La industria agrícola es una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos orgánicos, los que están constituidos principalmente por los tallos, raíces, hojas u otras partes de las plantas que no son utilizadas en ningún proceso (Gañan y Shah, 2005).

En el presente trabajo se hizo uso de los residuos provenientes del cultivo de coco (*Cocos nucifera*) y de plátano (*Musa balbisiana*) para obtener nanofibrillas de celulosa que sustituyan a las fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas son omnipresentes en la sociedad moderna. Estas fibras – fibras de carbono, nylon, poliéster, kevlar, spandex, etc. – se fabrican a partir de combustibles fósiles, por lo general a partir de aceite, pero algunas veces provienen de carbón o gas natural. La mayoría de estos materiales no son biodegradables, lo que plantea graves problemas ambientales al final de su ciclo de vida; y además tienen una huella de carbono significativa durante su producción. Las fibras naturales, por otra parte, como la lana y el algodón, provienen de animales o vegetales que son fuentes renovables, pero por lo general carecen de las características de alto rendimiento de muchas de las fibras sintéticas.

Las nanofibrillas de celulosa representan un gran interés hoy en día debido a su naturaleza renovable, buenas propiedades mecánicas y una relación longitud-diámetro muy alta, lo que conduce a que presente un área superficial muy grande, en comparación con las fibras tradicionales. (Alvarez-Castillo, 2012)

1.1 Justificación

El presente trabajo expone la necesidad ambiental de recuperar, reutilizar y reciclar los residuos sólidos orgánicos agrícolas como son los residuos de plátano y coco que se generan como un subproducto de las actividades comerciales, industriales o agrícolas, y que por lo general son una gran fuente de contaminación, por lo que actualmente se buscan usos alternativos para dichos residuos (Kadirvelu *et al.*, 2003; Reed y Williams, 2003).

En la industria platanera se produce una gran cantidad de residuos vegetales, ya que de la planta solamente se aprovecha el fruto y una vez cosechado la planta se desecha, teniendo que disponer de las demás partes de la misma: pseudotallo, hojas y pinzote o raquis (parte de la planta que sostiene los manojos de frutos). La producción anual de plátano en México es de alrededor de dos millones de toneladas, el racimo de frutos representa la quinta parte del peso de la planta, lo que da una idea de la enorme cantidad de residuos que se derivan de su producción. A pesar de que algunos de estos se aprovechan en diferentes formas, la gran mayoría todavía se desperdicia. (Paz, Y. 2011).

Por otro lado, el caso del coco (*Cocos nucifera*), la fibra producida a partir del mesocarpio es considerado como un residuo el cual podría ser reutilizado tanto de forma artesanal como tecnológica. El área total de los estados productores de coco llega a sumar alrededor de 162 mil 224 hectáreas (SAGARPA, 2014).

El sector textil es uno de los grandes contribuyentes al deterioro del entorno. Los principales impactos ambientales relacionados con esta industria tienen que ver con las aguas residuales que genera y en la carga química que las mismas contienen. Otros problemas importantes son el consumo de agua y energía, los malos olores, los residuos sólidos, los ruidos y la generación de emisiones atmosféricas. (Sustainable Brands, 2015).

Teniendo en cuenta todos estos aspectos negativos, en los últimos años se vienen desarrollando alternativas a las formas de producción convencionales para poder lograr productos textiles menos contaminantes.

Lo anterior conlleva a tomar en cuenta las técnicas biotecnológicas que recientemente se han desarrollado para el aprovechamiento de los residuos con el fin de reciclarlos y a su vez generar materiales de nueva generación como los que se han desarrollado en la escala de lo nanoscópico. En este caso particular cabe resaltar el de la nanocelulosa, ya que, por ser un material de origen vegetal con propiedades mecánicas y estructurales altamente resistentes, es considerado como una alternativa para disminuir el uso de materiales derivados del petróleo; ya que además es un material biodegradable y por lo tanto amigable con el ambiente.

Al ser un producto de origen natural, la nanocelulosa puede ser considerada como un compuesto amigable con el ambiente, es decir, que al final de su vida útil puede ser desechado sin daño alguno al ambiente; a este tipo de compuestos se le puede llamar “biocompuestos” o “compuestos verdes”.

Ya se han hechos estudios previos en relación a la composición química y usos de estos materiales, aunado a la gran cantidad disponible de residuos en los lugares de siembra y comercialización de ellos, los hacen ser una atractiva materia prima para la obtención de nanofibrillas de celulosa. Además del uso tradicional de las especies vegetales para la producción de papel, cartón, biocombustibles, entre otros; también se ha analizado la obtención de compuestos nanométricos para reemplazar materiales ampliamente usados, tales como las fibras sintéticas. (Gañan y Shah, 2005).

Con base en la información previamente consultada el objetivo de esta investigación se plantea a continuación.

1.2 Objetivos

General

Aislar las nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de pinzote de plátano y fibra de coco, utilizando un método químico, y elaborando con ellas biomateriales que puedan sustituir a las fibras sintéticas en textiles.

Particulares

1. Determinar la generación de residuos sólidos orgánicos de plátano y coco en la República Mexicana, con base en la normativa nacional.
2. Investigar el reúso, reciclaje o tratamiento alternativos que se le dan actualmente a estos residuos a nivel nacional.
3. Aplicar el método de muestreo por cuarteo y estudio de generación en la central de abasto de la Ciudad de México para la obtención de los residuos de plátano y coco.
4. Obtener y caracterizar, utilizando microscopía electrónica de barrido, las nanofibrillas de celulosa obtenidas por método químico a partir de los residuos de coco y plátano.
5. Producir hilo a partir de las nanofibrillas obtenidas, utilizando la tecnología de electrospinning.
6. Evaluar la factibilidad técnica-económica y ambiental de este estudio, empleando ponderación de valores.

1.3 Alcances

- El presente trabajo utilizará los residuos de pinzote de plátano y fibra de coco generados en la central de abasto de la Ciudad de México.
- Las pruebas y estudios se realizarán a nivel laboratorio.

2. MARCO LEGAL Y TEÓRICO

2.1 Normativa

La normatividad aplicable en materia de textiles se menciona en la tabla 2.1; así como la normatividad en materia de residuos se presenta en la tabla 2.2.

Tabla 2.1. Normativa en materia de textiles

Norma	Referencia	Aplicación
NMX-A-6938-INNTEX-2013	Industria textil – Fibras naturales – Nombres genéricos y definiciones.	Proporciona los nombres genéricos y las definiciones de las fibras naturales más importantes de acuerdo con su constitución específica u origen.
NMX-A-2076-INNTEX-2013	Industria textil – Fibras químicas – Nombres genéricos.	Enumera los nombres genéricos utilizados para designar los distintos tipos de fibras químicas que se fabrican actualmente a escala industrial para uso textil y de otra índole, así como los atributos distintivos que los caracterizan.
NMX-A-084/1-INNTEX-2005	Industria textil – Fibras textiles- Parte 1: análisis cuantitativo – método de prueba.	Establece los procedimientos individuales para la determinación cuantitativa del contenido de humedad, contenido no fibroso y composición de fibras textiles.
NMX-A-099-INNTEX-2005	Industria textil – Fibras – Terminología y clasificación de fibras y filamentos textiles.	Establece la clasificación, los nombres genéricos, las definiciones y en su caso la composición química, de las principales fibras, así como los atributos que las distinguen.

Tabla 2.2. Normativa en materia de residuos de manejo especial

Norma	Descripción
NOM-161-SEMARNAT-2011	Norma oficial mexicana que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.

2.2 Residuos agrícolas

Los residuos agrícolas son aquellas partes derivadas del cultivo de diferentes especies vegetales, particularmente durante la cosecha, que no son destinadas al consumo. Se incluyen en esta categoría materiales como tallos, hojas, cáscaras, cortezas, vainas, semillas, rastrojos, etc., que provienen de cereales (arroz, maíz, trigo, cebada), café, cacao, té, frutas (plátano, mango, coco, piña), legumbres (tomate, soya, frijol), algodón, y palma aceitera entre otros (Singh nee' Nigam y Pandey, 2009). Estos remanentes son producidos en millones de toneladas alrededor del mundo y representan una fuente de biomasa lignocelulósica abundante, barata y de fácil acceso. De estas enormes cantidades de residuos agrícolas, solamente una pequeña cantidad es empleada como alimento animal o combustible para hogares y una mayor porción es quemada en los campos creando un problema de contaminación ambiental. (Kalia et al., 2011).

Por sus constituyentes los residuos agrícolas pueden emplearse de diferentes maneras generando beneficios económicos y ambientales. (Singh nee' Nigam y Pandey, 2009; Mäkinen et al, 2010):

- a. En el reciclado de los nutrientes del suelo desplazando cantidades significativas de fertilizantes sintéticos y otros productos.

- b. La ceniza que se obtiene al quemar o gasificar la paja puede ser usada para regresar minerales al suelo.
- c. La celulosa puede ser usada para producir pulpa de papel.
- d. Como materia prima para la producción de biocombustibles.
- e. En la obtención de productos químicos como acetona, butanol y etanol.
- f. En Canadá y Estados Unidos las pajas procedentes de trigo, cebada, avena, y las cáscaras de arroz han sido empleadas para la producción de pulpa de papel y tableros aglomerados.
- g. Producción de carbón y briquetas.

2.3 Manejo de los residuos agrícolas en México

El manejo de los residuos agrícolas en México es prácticamente inexistente, así se reconoce en el programa Nacional para la prevención y gestión integral de residuos 2009-2012. Actualmente se carece de la información de su generación a nivel nacional. Ninguno de los programas para la prevención y gestión integral de residuos elaborados por los gobiernos estatales y a la fecha publicada incluye un análisis de los residuos de este sector, tampoco incorporan estrategias y acciones puntuales para su adecuada gestión y manejo. (CCA, 2014)

Los procesos que se han identificado en el manejo de estos residuos son la generación y disposición dispersa principalmente; en menor escala el acopio y traslado, y de manera rudimentaria el aprovechamiento para la producción de composta y/o alimento para animales. En otros casos se procede a la quema de los residuos. (CCA, 2014)

2.3.1 Quema de residuos agrícolas en México

La quema agrícola es una práctica tradicional muy común en México para eliminar residuos no deseados de cosechas de maíz, frijol, trigo, arroz y otros granos. También se queman ramas y malezas en huertos de árboles frutales, nogales y viñedos. Desafortunadamente, en ese proceso también puede producirse la quema de costales y plásticos usados en

invernaderos y zanjas, costales de insecticida y fertilizantes, papel y plásticos para protección (utilizados, por ejemplo, en los cultivos de plátanos y dátiles) y bandejas de secado, entre otros, mezclados con residuos de cultivos, lo que contribuye aún más a la contaminación. (SEMARNAT, 2012).

La práctica de “tumba, roza y quema” se ha utilizado tradicionalmente en México en los campos agrícolas para incorporar algunos nutrientes de manera rápida al suelo, deshacerse de la mala hierba y matar plagas. Sin embargo, se trata de una práctica muy contaminante, y si no se toman las precauciones adecuadas, el fuego se puede salir de control y provocar grandes incendios. Además, el uso del fuego para la preparación del terreno agrícola tiene, a largo plazo, consecuencias como la erosión del suelo, la pérdida de nutrientes y la reducción de la productividad. Aunque después de las primeras quemas pareciera que se favorece la aparición de rebrotes, a largo plazo se observa una disminución de la fertilidad, deterioro de la cubierta vegetal y pérdida de la humedad del suelo, lo cual a su vez se traduce en una baja en el rendimiento de los cultivos y la muerte de microorganismos e insectos benéficos.

Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos –incluidos los residuos agrícolas-, produce 40% del dióxido de carbono (CO_2), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de la materia particulada o partículas de materia suspendidas (PS) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial. Las quemas de residuos agrícolas son muy utilizadas a pesar de que no se trata de un manejo ambientalmente aceptable. (Lemieux, 2004). Además, desde el punto de vista de la salud pública, resultan preocupantes por una serie de razones:

- El humo de las quemas agrícolas se libera a nivel –o muy cerca- del suelo en áreas generalmente pobladas, lo que conlleva una exposición a los contaminantes directa y elevada de la población aledaña.
- Estas quemas se realizan generalmente por etapas, en temporadas específicas del año, y pueden dar lugar a concentraciones muy elevadas de contaminantes.
- Son fuentes no puntuales de contaminantes atmosféricos y se realizan en áreas muy extensas, por lo que resulta difícil medir y regular este tipo de emisiones.

- Las condiciones de la combustión y los combustibles varían e incluyen la posible presencia de plaguicidas.
- Contribuyen al cambio climático, ya que entre los compuestos emitidos se encuentran gases de efecto invernadero y contaminantes climáticos de vida corta, como el carbono negro.
- Afecta la visibilidad en zonas y carreteras aledañas.
- Además, en estos procesos de combustión incompletos se producen dioxinas, contaminantes altamente tóxicos y cancerígenos.

2.4 Producción agrícola en México

La agricultura es el cultivo de diferentes plantas, semillas y frutos, para proveer de alimentos al ser humano o ganado, y de materias primas a la industria. Gracias a la diversidad de climas, en México se cultiva una gran variedad de especies. En la tabla 2.3 se dan a conocer los principales productos que se generaron en México durante el 2013-2014.

Tabla 2.3 Año agrícola octubre 2013 – septiembre 2014

Producto	Producción, en hectáreas.
Maíz	6, 715, 157
Frijol	1, 878, 933
Papa	1, 500, 497
Café cereza	762, 479
Caña de azúcar	752, 154
Trigo	695, 290
Naranja	336, 544
Cebada	273, 452
Fresa	233, 041
Mango	220, 936
Durazno	198, 085
Limón	165, 138
Chile verde	143, 780
Aguacate	126, 807
Coco	100, 800
Plátano	89, 033
Soya	71, 664
Manzana	49, 508
Jitomate	48, 638
Uva	30, 002
Arroz	22, 869

FUENTE: INEGI. 2013 - 2014.

2.5 Producción de coco y plátano en México

Gracias a la diversidad de climas, en México se cultiva una gran variedad de especies. México cuenta con un territorio nacional de 198 millones de hectáreas de las cuales 145 millones se dedican a la actividad agropecuaria (SAGARPA, 2016).

En la tabla 2.4 se muestra el cierre de producción agrícola que hubo en el 2016 con respecto a los cultivos de plátano y de coco en el país.

Tabla 2.4 Cierre de producción agrícola

Cultivo	Superficie sembrada (Ha)	Superficie cosechada (Ha)	Producción (Ton)	Rendimiento (Ton/Ha)	PMR (\$/Ton)	Valor producción (miles de pesos)
Plátano	80,021.99	78,322.04	2,384,778.26	30.45	2,862.73	6,826,971.46
Coco fruta	14,984.90	14,594.54	189,152.04	12.96	2,087.16	394,791.43

Fuente: SAGARPA. 2016

En México la producción del coco se localiza en dos grandes regiones: La del Golfo y Caribe, en las costas de Tabasco, Veracruz, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. La del Pacífico; en las costas de Guerrero (Costa grande y costa chica), Colima, Oaxaca, Michoacán, Sinaloa, Jalisco y Chiapas.

En lo que respecta a la cosecha del plátano, los principales productores son Chiapas, Tabasco, Veracruz, Michoacán y Colima.

2.6 Cosecha de coco

La palmera de cocos crece en la proximidad de las costas. Su nombre está muy relacionado con leyendas del mar. Hoy, como hace miles de años, se consume fresco. El agua de coco

se emplea como bebida rehidratante y la pulpa se come fresca, con sal y limón. También se elabora en forma de dulces, bebidas o aceite (SAGARPA, 2016).

La palmera tiene un solo tronco, casi siempre inclinado, liso o áspero, y alcanza gran altura, de diez a veinte metros. Su grosor es de aproximadamente cincuenta centímetros, que va adelgazando conforme sube. La altura de la planta depende de las condiciones ecológicas, la edad de la palmera y el tipo de cocotero. Algunas especies crecen hasta llegar a los 24 metros. La palmera del coco es monoica: ambos sexos se encuentran en la misma planta. El coco tiene forma de ovoide -como la Tierra-, mide de veinte a treinta centímetros y pesa hasta dos kilos y medio. Está cubierto de fibras. Su cáscara es amarillenta, correosa y fibrosa, de cuatro a cinco centímetros de espesor, con pelos fuertemente adheridos a la nuez. Adentro se encuentra el endocarpio, una capa fina y dura de color marrón, llamada también hueso o concha. Luego se encuentra el albumen sólido o copra, que forma una cavidad grande. Adentro se aloja el agua de coco, o albumen líquido (SAGARPA, 2016).

Por la distribución geográfica del cocotero, se sabe que los climas cálidos y húmedos son los más favorables para su cultivo. Las costas son el lugar ideal. La temperatura media debe estar en torno a los 27°C sin variaciones mayores de 7°C. Cuando gozan de los beneficios del riego o el nivel del agua del subsuelo es poco profundo, la planta absorbe más agua y por consiguiente mayores nutrientes. Los cocoterios no pueden desarrollarse en la sombra. Necesitan una insolación de cuando menos dos mil horas al año y un mínimo de 120 horas al mes. Requieren además de mil quinientos milímetros de lluvia al año, o 130 al mes. Los vientos suaves o moderados favorecen su cultivo, en tanto que los vientos fuertes, sobre todo en periodos de sequía, aumentan la transpiración de la planta, que pierde mucha agua y resulta perjudicada (SAGARPA, 2016).

Las plantas que producen las semillas dan igual cantidad de palmas masculinas y femeninas. Sólo las femeninas son valiosas desde el punto de vista productivo. El suelo que se encuentra alrededor de la palmera debe regarse bien varios días antes de la separación, para asegurarse que la tierra que rodea las raíces queda adherida a ellas. Los cocos se cosechan entre el sexto y octavo mes, cuando contienen más agua y mejor sabor. De un

extremo de la sogá se amarra el racimo; otro operario sostiene la sogá tensa mientras se corta el racimo. El racimo se baja lentamente al suelo evitando que los cocos se desprendan. Se recomienda tumbar los cocos de la palma cada tres meses. Así la germinación de cocos es nula y la palma se mantiene en buen estado de salud (SAGARPA, 2016).

2.6.1 Variedades del cocotero

De acuerdo a las fichas técnicas encontradas en el sitio oficial de la SAGARPA, los tipos de cocoteros se clasifican en función de su altura en gigantes, enanos e híbridos y dentro de cada grupo existen un gran número de variedades de acuerdo con su localidad de origen.

Cocoteros gigantes. Son empleados para la producción de aceite y para consumo como fruta fresca, aunque su contenido de agua es elevado, el sabor es poco dulce. La polinización es cruzada, por ello existen una gran diversidad de variedades. Tiene una longevidad de 40-90 años, son robustos y prosperan en todo tipo de suelos y condiciones climáticas.

Comienzan a florecer a los 8-10 años de ser plantados, siendo la producción media de frutos por planta al año es de 50-80 en variedades gigantes.

Entre sus ventajas destacan el tamaño del fruto, la robustez de la planta y el contenido elevado de copra. Sin embargo, posee varios inconvenientes como: tolerante a la enfermedad conocida como Amarillamiento letal del cocotero, la fructificación tardía, la dificultad para realizar labores de cultivo por su elevado porte y la baja producción de frutos por planta.

Las variedades más cultivadas son: Gigante de Malasia (GML), Gigante de Renell (GRL) de Tahití, Gigante del Oeste Africano (GOA) de Costa de Marfil, Alto de Jamaica, Alto de Panamá, Indio de Ceilán, Java Alta, Laguna, Alto de Sudán, etc.

Cocoteros enanos. A diferencia de los tipos gigantes en los cocoteros enanos la autofecundación es mayor del 94%, lo cual disminuye la diferenciación entre padres e hijos. Tienen una longevidad de 30-35 años. Prosperan en suelos fértiles y florecen al cuarto año de ser plantados.

Las variedades más cultivadas son: Amarillo de Malasia (AAM), Verde de Brasil (AVEB) de Río Grande del Norte, Naranja Enana de la India.

En variedades enanas la producción media es de 150-240 frutos por planta al año. Debido al sabor del agua, su principal uso es la producción de agua para consumo en bebidas envasadas, por el pequeño tamaño del fruto es poco atractivo para consumo como fruta fresca.

Algunas de sus ventajas son: la resistencia al Amarillamiento letal del cocotero, la precocidad de producción, el elevado número de frutos por planta y el crecimiento lento. Entre sus inconvenientes destacan: el pequeño tamaño del fruto, la mala calidad de la copra y su susceptibilidad a periodos cortos de sequía.

Cocoteros Híbridos. Son el producto del cruce entre plantas del grupo de los gigantes y los enanos. Los usos de los híbridos son múltiples ya que adquieren las mejores cualidades de los padres dando como resultado frutos de tamaño de mediano a grande, buen sabor, buen rendimiento de copra, crecimiento lento, producción de frutos alta y también hereda la resistencia al amarillamiento letal del enano y mejorando la tolerancia del alto a otras enfermedades.

El híbrido más cultivado es: MAPAN VIC 14, que es un cruce entre Enano Malasino y Alto de Panamá.

En México hay tres tipos de cocoteros en explotación: El tipo “Caribe” (que crece en toda la zona del Golfo de México y el Caribe), el “Pacífico” (variedad típica de la costa del

Pacífico) y el enano “Malasia”. Se distribuyen en 13 estados de la República Mexicana, al Sur del Trópico de Cáncer.

2.6.2 Ficha técnica de industrialización de coco

En la literatura se hace énfasis en que el coco tiene muchas posibilidades para ser utilizado a nivel industrial. De hecho, se pueden obtener productos benéficos para el hombre desde las raíces hasta las hojas. Sin embargo, el aprovechamiento principal que se le da es en el fruto: agua, carne, cáscara y concha. (Cifuentes, et al. 2011).

Por medio de procesos industriales se pueden obtener diversos productos y subproductos, los cuales se clasifican en tres grupos principales, a saber:

1. Productos con contenido importante de materia grasa, utilizados para la alimentación humana.
2. Productos fibrosos, utilizados en la industria textil.
3. Productos diversos como carbón activado, madera, materiales para revestimientos, etc.

Los productos derivados del coco normalmente encontrados a nivel mundial son:

- Coco entero sin procesar.
- Endospermo entero y deshidratado, utilizado para la extracción de aceite y ralladura (Copra).
- Aceite, extraído de copra y pulpa fresca.
- Torta de coco, conocido como los residuos de la extracción del aceite de la copra.
- Fibra de coco.
- Coco deshidratado.
- Carbón activado.
- Coco rallado: integral, azucarado, desengrasado.

Algunos de estos son destinados para el consumo humano como aceite de coco, copra y coco deshidratado; y otros para consumo animal como la torta de coco.

2.6.3 Usos alternativos de los residuos agrícolas de coco

La fibra de coco es un material natural renovable extraído de la capa externa del coco del fruto de la palmácea o cocotero. El fruto del coco está compuesto por la cascara (mesocarpio y exocarpio), casco o hueso (endocarpio) y albumen o carne (endospermo).

El mesocarpio o fibra se utiliza en tapicería, fabricación de colchones, cuerdas, entre otros. La fibra de coco es un material resistente a la putrefacción y no requiere tratamientos químicos; posee una durabilidad y tensión alta frente a otras fibras naturales, lo que lo hace un material atractivo para el presente trabajo. (Novoa, M. 2005).

La fibra de coco pertenece a la familia de las fibras duras como el henequén. Se trata de una fibra compuesta por celulosa y leño que posee baja conductividad al calor, resistencia al impacto, a las bacterias y al agua. Su resistencia y durabilidad la hacen un material adecuado para el mercado de la construcción, para usarlo como material de aislamiento térmico y acústico. La industria textil utiliza fibra de coco para elaborar hilos, redes de pesca, así como relleno para colchones y sillones. (Novoa, M. 2005).

La fibra de coco también puede utilizarse en la fabricación de colchones para saltar, porque tiene una gran elasticidad. Alfombras, porque tienen una gran durabilidad, una mayor retención de la suciedad, y fungicidas naturales. Equipos de Perforación en especial para los buques, ya que es resistente al agua de mar. Cepillos, escobas. Material de relleno para los cojines. Fabricación de madera prensada utilizada en la construcción de casas. Fabricación de alfombras de fibra de coco. Embalaje ecológico para las flores, las mantas también se utilizan para envolver ramos de flores, ramos y flores en macetas. Ampliamente utilizado en el campo de la jardinería y la decoración. Fabricación de embarcaciones. (Novoa, M. 2005).

La industria del automóvil hace un gran uso de fibra de coco. En Brasil, Mercedes-Benz en 1994 comenzó a utilizar la fibra de coco en la fabricación de cabezales para los camiones. Desde 1999, el producto también cuenta con los asientos delanteros del modelo Clase A. Otros fabricantes de automóviles europeos utilizan relleno de fibra de coco. La fibra de coco ofrece muchas ventajas sobre la espuma de poliuretano, que es comúnmente utilizado en la tapicería. Algunas ventajas son que es natural, biodegradable, no causa impactos ambientales, y permite una mayor comodidad. (Novoa, M. 2005).

2.7 Cosecha de plátano

El plátano, también conocido como banana, es una de las frutas más consumidas en México y el mundo. Se come crudo o cocinado. En la industria también se utiliza para la preparación de tostones de plátano, rodajas que se sazonan con sal, ajo o cebolla, entre otras especias. (Mohapatra, et al. 2010).

El plátano es una planta perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares. Alcanza hasta siete metros y medio de altura, con terminación en una corona de hojas. Desarrolla una masa de pulpa comestible sin necesidad de polinización. Los óvulos se atrofian pronto, pero pueden reconocerse en la pulpa comestible. Debido a diversas causas genéticas, la mayoría de los frutos de la familia de las musáceas comestibles son estériles, es decir, sus semillas no producirán nuevas plantas. El plátano requiere temperaturas relativamente altas para desarrollarse, entre 21 y 29°C. Lo mínimo permisible son 15°C y el máximo 37. Si se expone a temperaturas fuera de estos límites, la planta se deteriora y el fruto se daña. (Bornare, et al. 2014).

La siembra se lleva a cabo en hoyos de sesenta centímetros de profundidad, cada uno a tres metros de distancia. Se colocan dos plantas por hoyo, una más pequeña que la otra, ambas desprovistas de hojas. Se llena y se pone tierra hasta diez centímetros por encima de la inserción de las raíces. Se deja un surco alrededor de la planta para que retenga el agua y se extiende estiércol para que la tierra no se seque. En algunos métodos de plantación, como en la siembra en triángulo y doble surco, se obtiene una mayor cantidad de plantas por

hectárea. Sin embargo, cuando el plátano crece en densidades muy altas la plantación requerirá mayor cuidado, sobre todo para el control de enfermedades, pues habrá mayor humedad. (Bornare, et al. 2014).

El momento de la cosecha llega cuando los plátanos ya alcanzaron su completo desarrollo y empiezan a ponerse amarillos. Con mucha frecuencia se recolectan verdes y se dejan madurar suspendidos en un lugar oscuro, seco y cálido. La planta se corta por el pie en cuanto se recoge el fruto, dejando los vástagos en la base. Éstos fructificarán después de cuatro meses, de modo que en un año pueden hacerse tres recolectas. (Bornare, et al. 2014).

2.7.1 Variedades del plátano

Hay muchísimos tipos de plátano, pequeños, medianos y muy grandes. En México se cultivan principalmente ocho variedades:

1. Dominicó.
2. Macho.
3. Valery.
4. Pera.
5. Tabasco.
6. Morado.
7. Manzano.
8. Chiapas.

2.7.2 Usos alternativos de los residuos agrícolas de plátano

En las empacadoras de plátano se descartan toneladas de fruto que no cumplen con los requisitos para su comercialización, ya sea por estar dañados físicamente, por ser muy pequeños, etc., pero que son aptos para ser aprovechados, en algunos casos, incluso en la preparación de alimentos. (Mohapatra, 2010).

- Harina. De los frutos verdes puede obtenerse harina o fécula. Para evitar el oscurecimiento de la pulpa que se produce después del pelado y durante la maceración, es recomendable someter el fruto al vapor antes de pelar la pulpa, cortarla y deshidratarla, lo que se conoce como escaldado. Éste es un método barato que facilita también la eliminación de la cáscara, sobre todo si no se cuenta con maquinaria especial de pelado. El escaldado también aumenta la solubilidad de la harina y disminuye su viscosidad, lo que es importante en algunos suplementos alimenticios, como las pastas para bebés.

Para su industrialización, la harina de plátano debe ser muy fina al tacto; para su almacenamiento y manejo se le adiciona más o menos uno por ciento de sustancias desecadoras, como carbonato de calcio. Esta harina puede ser utilizada entonces en la preparación de pudines, panes, helados, malteadas y otros productos.

- Jaleas, mermeladas y golosinas. La pulpa de plátano se puede aprovechar también en la preparación de jaleas, mermeladas, jarabes y golosinas como los llamados Chips, que son hojuelas preparadas a base de rodajas secas y fritas de la pulpa del fruto verde y que se pueden acompañar de salsas agridulces o picantes o comerse sin aderezos. El tamaño de los chips es variado, y van desde rodajas pequeñas (cortes transversales del fruto) hasta un filete longitudinal.
- Bebidas. Para la elaboración de bebidas alcohólicas se utilizan frutos maduros y sanos. Los frutos muy maduros pueden emplearse para preparar un jugo energético tipo “néctar”. Se puede utilizar agua caliente para evitar que la pulpa se oscurezca.

Las bebidas alcohólicas no destiladas (cerveza, vinillo) se preparan a partir de frutos maduros y sanos, los cuales se lavan abundantemente para eliminar microorganismos que pudieran arruinar la fermentación alcohólica. La pulpa machacada se mezcla en proporciones adecuadas con agua y levadura preparada previamente. La fermentación se realiza en un recipiente cerrado, adaptando una trampa para eliminar el dióxido de carbono que se produce durante la fermentación. El proceso casero o doméstico puede llevar aproximadamente veinte días, pero en la industria el tiempo se reduce significativamente mediante la adición de enzimas que hidrolizan el almidón de la pulpa. Al final se calienta o pasteuriza para detener la fermentación y evitar la degradación del etanol, tras lo cual se filtra y envasa.

- Vinagre. Al igual que en la fermentación alcohólica, se emplean aquí frutos maduros. Se realiza primero una fermentación alcohólica, la cual se deja más tiempo para que el alcohol sea transformado en ácido acético; después de veinte días, se abre el envase, se recupera el líquido, se diluye para disminuir la concentración del alcohol y se traspa a un recipiente de mayor capacidad porque se requiere oxígeno para la generación de ácido acético, donde se fermenta. El proceso lleva aproximadamente dos meses. El producto es un vinagre apreciado por su buen aroma y cuerpo.
- Almidón y derivados. El almidón es uno de los compuestos biológicos más importantes y un componente vital en la dieta de humanos y animales. Prácticamente, la energía para vivir se obtiene del almidón. Además de su importancia en la industria alimenticia, es importante en la industria textil y del papel, en la fabricación de adhesivos biodegradables (bio-pegamentos) y en la elaboración de bio-películas y bio-plásticos para la fabricación de la recubierta de tabletas farmacéuticas y muchos productos más.

Este polímero se obtiene de cereales, leguminosas y tubérculos, pero siendo el contenido de almidón del plátano equiparable a estas fuentes, los frutos que no son aptos para el consumo son una alternativa para este fin. La aplicación particular del almidón depende de sus propiedades físico-químicas: viscosidad, gelificación, esponjamiento y firmeza. Las variedades de plátanos y bananos contienen almidón con diferentes propiedades, por lo que sus usos pueden ser muy variados.

Aprovechamiento de hojas, pseudotallos y pinzotes

- Fibras. Estos materiales tienen también múltiples aplicaciones. Particularmente se utilizan para extraer la fibra para elaborar artesanías (sombreros, abanicos, zapatos, bolsos, carteras, sacos, etc.) o para la obtención de la celulosa para la fabricación de papel. Las fibras también se usan para reforzar materiales compuestos. Debido a su baja dureza, disminuyen el nivel de desgaste en los equipos y tienen propiedades de aislante térmico y acústico, y actualmente han atraído el interés por ser biodegradables, renovables y de bajo costo. Para la producción de fibras se han utilizado *Musa textil*, *M. balbisiana* y sus híbridos, así como algunas variedades de

M. acuminata. Los materiales se cortan, se extienden para un secado al sol durante dos o tres días y luego las fibras se extraen y se limpian.

La resistencia de la fibra depende de la variedad usada. Las fibras más resistentes se emplean en la elaboración de cuerdas para barcos, las cuales son muy fuertes y flotan en el agua; las livianas se ocupan en la fabricación de artesanías y pasta para papel, y también se ha propuesto que se utilicen para la filtración de agua residual y como sustrato para el crecimiento bacteriano en la biorremediación de ambientes contaminados. En Filipinas, las fibras se usan en la confección de elegantes vestidos de novia y túnicas para las bodas. Las aplicaciones de las fibras son, pues, muy versátiles.

- Celulosa y papel. La celulosa del plátano se obtiene del pseudotallo y pinzotes. Estos se cortan en piezas pequeñas y la celulosa se extrae calentándolos en álcalis como el hidróxido de sodio. Esta mezcla “cocida” se lava con agua para neutralizar el pH y se muele hasta obtener una pulpa. La masa gelatinosa (la celulosa) se separa por filtración y se aplica como película delgada sobre una superficie plana, que al secarse constituye el papel. El papel de plátano es de tipo artesanal, muy apreciado por artistas y decoradores de hogares, y es asimismo utilizado para hacer invitaciones o artesanías. La textura depende del tamaño de las fibras, las más largas de las cuales producen un papel más resistente. La calidad de la celulosa de plátano es apta para elaborar también cartón.
- Harina para alimentación animal. Los pinzotes, pseudotallos y hojas se deshidratan y muelen para preparar una harina que se utiliza en la alimentación de cerdos y rumiantes, pero las propiedades nutricionales de estas harinas son bajas. Los residuos de las hojas tienen un alto contenido de cenizas y uno bajo de materia orgánica, por lo que su contenido energético es asimismo bajo, así como la proteína. También ha crecido la tendencia de dar a los cerdos los frutos de plátano, sobre todo cuando se combina la producción comercial de aquel y la cría de cerdos, pero esta práctica resulta costosa al final porque los animales demoran mucho en alcanzar el peso de venta. Los plátanos son una rica fuente energética, pero casi nula de proteína, por lo que algunos porcicultores incluyen harinas o pastas de soya y sorgo para

complementar la nutrición. Otros opinan que se obtienen mejores resultados si las harinas se restituyen en leche.

- Bioenergía. Las hojas, pinzotes y pseudotallos puede emplearse para generar biocombustibles, como el biogás metano o el bioetanol. El primero se obtiene por acción bacteriana en recipientes cerrados, mientras que el segundo se genera mediante la fermentación alcohólica de los azúcares obtenidos de la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa. Para la generación de biocombustibles también pueden aprovecharse los frutos dañados, y para el metano hasta los podridos, siendo así una alternativa para eliminar de las fincas plataneras las hojas infectadas.

En México, el plátano es uno de los principales cultivos agrícolas. Nuestro país ocupa el octavo lugar como exportador y nuestro consumo per cápita es superior al del frijol y arroz. La producción anual de plátano en México es de alrededor de dos millones de toneladas, pero el racimo de frutos representa menos de la quinta parte del peso de la planta, lo que da una idea de la enorme cantidad de pseudotallos, hojas y pinzotes que se derivan de la producción bananera. Algunos de estos se aprovechan en diferentes formas, pero la gran mayoría todavía se desperdicia. (Meneses, et al. 2010).

2.8 Celulosa

La Celulosa es el principal componente de las paredes celulares de los árboles y otras plantas. Es una fibra vegetal que al ser observada en el microscopio es similar a un cabello humano, cuya longitud y espesor varía según el tipo de árbol o planta. Las fibras de algodón, por ejemplo, tienen una longitud de 20-25 mm., las de Pino 2-3 mm. y las de Eucalipto 0,6-0,8 mm. De igual manera, el contenido de celulosa varía según el tipo de árbol o planta que se considere. (Hon, et al. 2001).

Desde el punto de vista bioquímico, la celulosa $(C_6H_{10}O_5)_n$ con un valor mínimo de $n = 200$, es un polímero natural, constituido por una larga cadena de carbohidratos polisacáridos. La estructura de la celulosa se forma por la unión de moléculas de β -glucosa a través de enlaces β -1,4-glucosídico, lo que hace que sea insoluble en agua. La celulosa

tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas muy resistentes e insolubles al agua. De esta manera, se originan fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales, dándoles así la necesaria rigidez. (Hon, et al. 2001).

La celulosa es un polisacárido sintetizado en gran cantidad por las plantas, constituye entre el 35 y 50 % del peso seco de estas, y también es sintetizado por bacterias y una variedad amplia de algas. Está constituida por moléculas de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos β -1,4, y se requieren 8 unidades monoméricas de glucosa para formar un producto insoluble. Dependiendo de la fuente, puede tener entre 8,000 y 15,000 unidades monoméricas por cadena. El polisacárido está localizado en la pared celular, donde se encuentra como unidades submicroscópicas de forma alargada llamadas micelas. Estas micelas se organizan en estructuras más grandes, las microfibrillas, las cuales se empaquetan formando una estructura cristalina altamente ordenada, en la cual todos los átomos están fijos en posiciones discretas uno con respecto a otro; este empaquetamiento previene la penetración no solo de enzimas, sino de pequeñas moléculas como el agua. Esta estructura se encuentra rodeada por polisacáridos hemicelulósicos que se unen a la celulosa por puentes de hidrógeno y enlaces covalentes, haciéndola aún más resistente a la hidrólisis química y biológica. No toda la estructura de la celulosa es cristalina, existen regiones “desordenadas”, denominadas regiones amorfas, con una composición heterogénea caracterizada por una variedad de enlaces. Este arreglo asimétrico que caracteriza las regiones amorfas es crucial para la biodegradación de la celulosa. Además de estas regiones, como torceduras y espacios, en las cuales se forman microporos y capilares lo suficientemente amplios como para permitir la penetración de moléculas relativamente grandes. En la figura 2.1 se muestra la estructura de la celulosa, y en la figura 2.2 se muestra la estructura de la pared celular CH_2OH . (Gutiérrez-Rojas, et al. 2015).

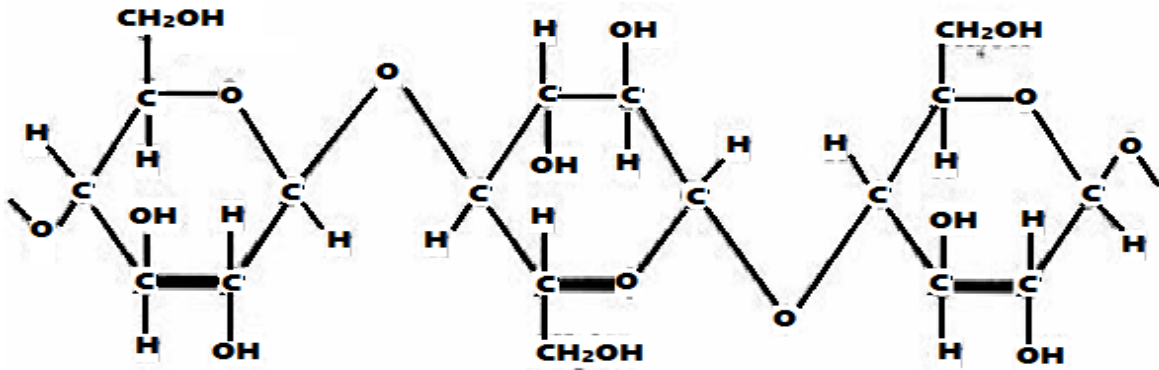


Figura 2.1. Estructura de la celulosa. (Gutiérrez-Rojas, et al. 2015)

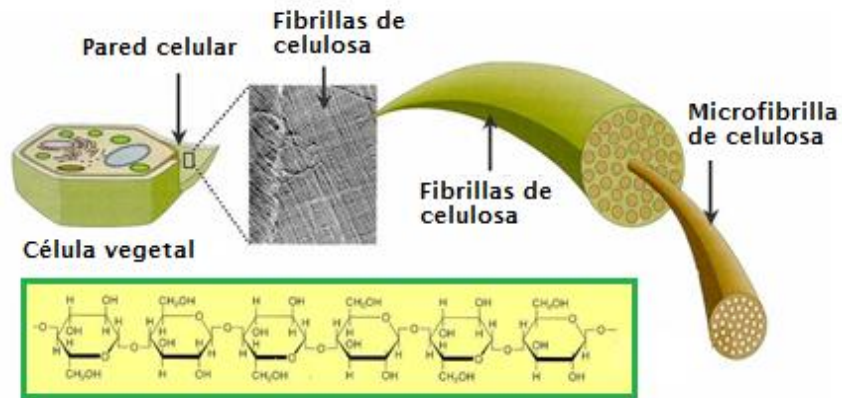


Figura 2.2. Estructura de la pared celular de la célula vegetal. (En línea)

2.8.1 Desarrollo de la celulosa.

Como Raven, *et al.* menciona en su libro de biología, los árboles, plantas y algas fabrican las sustancias para su crecimiento mediante el proceso de la fotosíntesis (foto = luz/síntesis = hacer). En el caso de los árboles y plantas verdes, consiste en una reacción química que se produce en las hojas con la ayuda de la clorofila (pigmento verde que absorbe la energía de la luz del sol para convertirla en alimento) y que combina la energía de la luz solar, el dióxido de carbono del aire y el agua absorbida del suelo. A través de este proceso el árbol obtiene alimento en la forma de azúcares, tales como la sacarosa y la maltosa. Toda esta cadena concluye con la instalación de la glucosa en el cambium (capa situada entre la corteza y la madera del árbol) para ser sintetizada, dando origen a la celulosa.

Las plantas verdes producen en sus hojas las sustancias para su crecimiento mediante el proceso de fotosíntesis, una compleja reacción química que se lleva a cabo en las hojas. La fotosíntesis es el proceso a través del cual las plantas verdes utilizan la energía de la luz solar para fabricar carbohidratos a partir del dióxido de carbono y el agua, en presencia de la clorofila. En estas plantas, el agua y otros nutrientes son absorbidos desde el suelo por las raíces y trasladados hacia las hojas a través del xilema, una de las componentes del “sistema circulatorio” de las plantas. El dióxido de carbono es obtenido del aire que entra a las hojas a través de las estomas (poros) y se difunde hacia las células que contienen la clorofila. Este pigmento fotosintético verde denominado clorofila tiene el atributo único de ser capaz de convertir la energía activa de la luz en una forma latente de energía que puede ser almacenada (como alimento) para ser usada cuando se necesite.

La fase inicial del proceso de fotosíntesis es la descomposición del agua (H_2O) en Oxígeno, que es liberado a la atmósfera a través de las estomas y el Hidrógeno. Se requiere luz directa para realizar este proceso. Posteriormente este Hidrógeno más el Carbono y el Oxígeno del dióxido de carbono (CO_2) son transformados en una secuencia de compuestos cada vez más complejos, los cuales finalmente dan origen a un compuesto orgánico estable denominado Glucosa ($C_6H_{12}O_6$) y Agua. Esta fase del proceso utiliza la energía acumulada y por lo tanto puede desarrollarse en la oscuridad. La ecuación química simplificada de este proceso global es: $6CO_2 + 12H_2O + (\text{energía}) - C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$ En general, los resultados de este proceso son los inversos a los de la respiración, en la cual los carbohidratos son oxidados para liberar la energía, produciendo dióxido de carbono y agua.

El principal producto de la fotosíntesis, la glucosa, es la piedra angular de los carbohidratos (azúcares, almidones y celulosa). Los azúcares solubles (sacarosa y maltosa) son usados como fuente inmediata de energía. Los almidones no solubles son almacenados como pequeños gránulos en distintas partes de la planta, principalmente hojas y raíces (incluyendo los bulbos) desde donde pueden ser consumidos por la planta cuando requiera de energía, y en los frutos. La celulosa es usada para construir las paredes rígidas de las células, que son la principal estructura soportante de las plantas. La glucosa llega al cambium a través del floema, la otra componente del “sistema circulatorio” de las plantas.

El cambium es un tejido vegetal específico de las plantas leñosas, ubicado entre la corteza y la madera, compuesto normalmente por una capa única de células embrionarias que son las responsables del crecimiento de las plantas.

En la actualidad, es ampliamente conocido que el papel es uno de los productos de mayor uso en la vida del hombre. Se fabrica a partir de una materia prima renovable: las fibras de celulosa extraídas principalmente de los árboles, pero también de otras especies vegetales, como paja, bagazo de la caña de azúcar, bambú, algodón, lino, entre otros.

Sin embargo, es menos conocido que la celulosa se encuentra comercialmente disponible en una gran variedad de presentaciones y se utiliza en las industrias de los detergentes, textil y alimenticia, entre otras. Esto se debe a la posibilidad de romper la molécula de fibra celulósica (un polímero) en unidades más pequeñas, gracias a la acción de algunas enzimas llamadas celulasas.

La celulasa es una enzima compleja especializada en descomponer celulosa, transformándola en múltiples monómeros de glucosa. Es producida con leves diferencias químicas por los integrantes del reino de los Hongos y el de las Bacterias. Los cuales son los mayores descomponedores del planeta.

Al estudiar las enzimas celulasas que utilizan naturalmente los hongos y bacterias para degradar la celulosa, se encontró que la hidrólisis (degradación) de este polímero es muy compleja. Por eso, es necesario investigar las estructuras y funciones de estas enzimas para conocer con mayor detalle los mecanismos enzimáticos involucrados en la degradación de la celulosa.

En este sentido, se espera que las herramientas moleculares y biotecnológicas permitan mejorar los procesos ya existentes, o bien encontrar nuevas aplicaciones.

2.8.2 La celulosa: el polisacárido natural más abundante en la naturaleza

La celulosa es el principal componente de la pared celular de la mayor parte de las plantas. Una célula vegetal joven contiene aproximadamente un 40% de celulosa y la madera un 50%. El ejemplo más representativo lo constituye el algodón que contiene más de 90% de celulosa.

Teniendo en cuenta su estructura química, se define como un polisacárido lineal formado por residuos de glucosa unidos por enlaces beta 1-4 (β -1,4). La configuración β , le permite a la celulosa formar cadenas largas y lineales, las cuales se presentan unidas entre sí por medio de enlaces de puentes de hidrógeno dando lugar a la formación de microfibrillas. Estas regiones, conocidas como regiones cristalinas, son altamente ordenadas y le dan las características de insolubilidad, rigidez y resistencia al ataque enzimático.

En ciertas regiones del haz de microfibrillas, las cadenas se rompen mediante sus puentes de hidrógeno y se forman regiones denominadas amorfas, las cuales se hidratan permitiendo que ciertas enzimas ataquen y degraden a la celulosa.

A pesar de que está formada por unidades de glucosa, los animales no pueden utilizar a la celulosa como fuente de energía, ya que no cuentan con las enzimas necesarias para romper los enlaces β -1,4-glucosídicos. Sin embargo, en el intestino de los rumiantes, herbívoros y termitas, existen microorganismos que poseen una enzima llamada celulasa que rompe éste enlace. Al hidrolizarse la molécula de celulosa quedan disponibles las moléculas de glucosa que pueden emplearse como fuente de energía. (Raven, et al. 2014).

2.8.3 La celulosa y la industria

Muchas son las utilidades industriales que se le puede dar a la celulosa. Para la industria de alimentos y farmacéutica, por ejemplo, es sometida a modificaciones que generan una serie de compuestos con múltiples propiedades funcionales: la carboxi-metil celulosa que se

utiliza como espesante, la celulosa microcristalina es usada como anti-compactante y en la industria farmacéutica para elaborar tabletas. (Santos, L. 2014).

Otra aplicación de la celulosa es la obtención de biocombustibles. Muchos investigadores están poniendo sus esfuerzos en buscar alternativas para la obtención de etanol como combustible. La celulosa sería una fuente de glucosa que actuaría como sustrato para la fermentación alcohólica. (Santos, L. 2014).

En la industria textil, las celulasas juegan un papel muy importante en el desteñido de telas de jean ya que se usan para remover el color azul índigo y dar una apariencia de desteñido. Tradicionalmente este desteñido se realizaba con piedra pómez (“stone wash”). En la actualidad, una pequeña cantidad de enzima puede sustituir varios kilos de piedras. Con la reducción de las piedras se producen menos daño a las telas y menos desgaste de las lavadoras. (Santos, L. 2014).

Las celulasas también son utilizadas en la industria de los detergentes. La enzima degrada las microfibrillas que se separan parcialmente de las fibras principales, restituyendo a las fibras una superficie suave y a la prenda su color original. (Santos, L. 2014).

Dentro de la industria alimenticia, las celulasas se usan para favorecer la extracción y filtración de jugos de frutas o verduras, filtración de mostos, extracción de aceites comestibles, entre otras aplicaciones. (Santos, L. 2014).

2.9 Nanotecnología

Los términos empleados para definir la nanotecnología no son aceptados en su totalidad debido a que aparece como una disciplina abierta en la que convergen muchos campos del conocimiento tales como la física, química, biología, etc., sin embargo, de manera general se podría definir como:

La fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a la escala del nanómetro (0.1 a 100 nanómetros), así como la aplicación de nuevos conceptos y propiedades que surgen como consecuencia de esa escala tan reducida (FECYT, 2009).

Esta escala de tamaños es un tanto arbitraria. El límite inferior parece claro, ya que por debajo del átomo no hay “objetos” manipulables, pero el límite superior (una centena de nanómetro) es una referencia para indicar que los objetos deben de estar por debajo de la micra (FECYT, 2009).

Para lograr el control deseado en la nanotecnología es necesario disponer de un ambiente con un orden molecular preciso, pero la manera de cómo obtener dicho ambiente es altamente discutido. En cambio, el movimiento en el estudio de la química, es descontrolado y aleatorio dentro de los límites de la energía potencial superficial (relación entre la energía de las moléculas y su geometría) de los átomos y moléculas que sean considerados. (FECYT, 2009).

2.9.1 Propiedades y comportamientos que ocurren en la nanoescala

Todo objeto es delineado por sus límites. El hecho de disgregar la materia en partículas pequeñas tiene consecuencias en los procesos físicos. Es así que, si se considera un objeto de dimensiones conocidas y calculamos su volumen y área para luego dividirlo en “n” partículas pequeñas, se puede observar, como a medida que se reduce su tamaño la superficie se ve incrementada mientras su volumen permanece constante (Ramsden, 2009).

De esta manera a medida que los objetos se hacen más pequeños, se van convirtiendo más “en superficies”, donde los átomos tienen menos vecinos, pueden “sentir” mejor la presencia de otros átomos externos y reaccionar con ellos, y también aumenta su posibilidad de escapar antes del material. Estas modificaciones en las propiedades se conocen como efectos de tamaño finito (FECYT, 2009).

Para ilustrar esas modificaciones se puede considerar que, si el objeto inicial es calentado por un proceso interno, la cantidad de calor es proporcional al volumen V y la pérdida de calor hacia el exterior se da por su superficie S , al dividirlo en “ n ” partículas su superficie se verá incrementada, necesitando producir más energía para compensar su relativamente mayor pérdida de calor y así mantener la misma temperatura (Ramsden, 2009).

Así mismo la fuerza gravitacional entre los objetos que depende de la distancia entre ellos y de su masa será tan débil que puede descartarse ya que los objetos apenas poseen masa a esas dimensiones (Williams y Adams, 2007).

De la misma manera si se considera la conductividad eléctrica en un hilo de cobre, cuando se aplica una diferencia de potencial, o voltaje, V entre los extremos del cable, los electrones se aceleran en presencia del campo eléctrico y la correspondiente fuerza eléctrica. Sin embargo, este incremento de velocidad de los electrones se ve truncado porque en su camino colisionan inelásticamente con diversos obstáculos perdiendo parte de su energía que es cedida a los átomos del material con su consecuente calentamiento. La distancia promedio que una partícula recorre entre dos colisiones consecutivas se define como “recorrido libre medio inelástico”, pero dicho recorrido es inversamente proporcional a la temperatura. Por ejemplo, para un hilo de cobre o de oro a temperatura ambiente ($T=300$ K), el recorrido libre medio inelástico es de unos 39 nm y si se decide bajar la temperatura a 10 K el recorrido libre medio aumenta a 3700 nm, con la consecuencia de que el electrón en esas condiciones puede viajar grandes distancias sin impedimentos.

Este fenómeno conocido como transporte balístico también podría lograrse si se fabrica un cable de oro de 20 nm de diámetro y 20 nm de longitud, con lo que el recorrido libre medio sería mayor que el tamaño del cable y así el electrón transitaría por el cable sin excesivas colisiones disminuyendo o eliminando la resistencia (FECYT, 2009).

2.10 Nanocelulosa

La celulosa muestra una estructura jerárquica conformada por cadenas cristalinas que se agregan mediante fuerzas Van der Waals y enlaces de hidrógeno intra e inter moleculares dando lugar a nanofibrillas en la pared celular de las plantas.

Este agrupamiento genera un número pequeño de defectos, por lo que se considera que los cristales de celulosa están unidos por dominios amorfos formando la fibrilla elemental. Por lo tanto, se ha obtenido en general dos formas o tipos de nanocelulosa dependiendo del método de extracción y de la fuente de la que se parte.

La primera de ellas es la celulosa nanofibrilar (CNF) que consiste en partes cristalinas y amorfas alternadas. Posee un diámetro entre 10 y 40 nm y con longitudes por sobre los 1000 nm, su morfología se la suele asemejar al de un tallarín. Se han reportado varios métodos para su extracción, pero los más utilizados son los mecánicos como: criomolienda y homogenización a alta presión. (Carchi, 2014).

Es común pre tratamientos para remover otros constituyentes mediante enzimas, oxidantes, y sustancias alcalinas disminuyendo el consumo energético.

El otro tipo es el de Whiskers de celulosa o celulosa nanocristalina (CNC) que es básicamente una nanopartícula cristalina con forma de una barra alargada, asemejándose a un grano de arroz. Se puede extraer mediante hidrólisis ácida controlada de plantas o animales (ciertas bacterias y tunicados). Se ha reportado diámetros entre 2 y 20 nm y longitudes entre 100 y 600 nm, inclusive un poco superior a los 1000 nm. El tamaño depende del origen de la celulosa, así como de la temperatura, tiempo, concentración y naturaleza del ácido empleado para la hidrólisis. (Carchi, 2014).

Un procedimiento típico aplicado para la producción de CNC consiste en remover los constituyentes asociados a la celulosa por tratamientos químicos, así la celulosa purificada es sometida a hidrólisis con un ácido fuerte bajo condiciones controladas, seguido de una

dilución en agua y sucesivos lavados usando centrifugación para remover el ácido libre. Se suele considerar una etapa de tratamiento con ultrasonido para separar los sólidos agregados. Finalmente se obtiene una suspensión coloidal estable (Ferrer, 2013).

2.11 Nanocompuestos

Se considera que rellenos de tamaño nanométrico tienen mayor facilidad para transferir el estrés desde la matriz hacia el relleno como consecuencia de su gran área superficial, además se ha observado que estas nanopartículas pueden inducir la cristalización del material de la matriz mejorando sus propiedades termo-mecánicas. (Pillai, 2011).

En los últimos años se ha centrado el interés en la investigación de nanocompuestos con nanopartículas de celulosa con la finalidad de crear materiales biodegradables que puedan reemplazar a los tradicionales, o bien mejorar sus propiedades. Por ejemplo, se ha estudiado como refuerzo en biopolímeros como el polihidroxi octanoato (PHO), acetato butirato de celulosa (CAB), ácido poliláctico (PLA) y almidón plastificado. También se ha estudiado el refuerzo en polímeros sintéticos como polipropileno, polioxietileno (POE), poliestireno – co – butil acrilato, policloruro de vinilo (PVC) entre otros. (Pillai, 2011).

Se cree que la nanocelulosa forma un armazón o esqueleto dentro de la matriz polimérica posiblemente por los enlaces de hidrógeno que existen entre las partículas.

La naturaleza hidrofílica de la nanocelulosa es muchas veces un limitante en su utilidad ya que disminuye la compatibilidad con las matrices poliméricas, para afrontar este problema se ha buscado diferentes procedimientos para introducir grupos químicos que puedan mejorar la interrelación matriz – relleno, reemplazando grupos hidroxilos presentes en la superficie de la celulosa. Aunque el tratamiento químico no cambie la morfología o cristalinidad de la celulosa, puede reducir la capacidad de refuerzo debido a una disminución en los enlaces de hidrógeno como consecuencia de la inserción de los grupos químicos.

Una propiedad interesante de los filmes producidos con compuestos rellenos de nanocelulosa es que se puede generar diferentes colores de acuerdo al espesor del filme. En principio esto se debe a que la celulosa transfiere su estructura quiral al filme reflejando la luz con una longitud de onda igual a “ nP ”, donde “ n ” es el índice de refracción y “ P ” es la distancia de una vuelta completa de la hélice medida de forma paralela al eje de la misma (Helical pitch). El tamaño de este último, depende de parámetros como temperatura, concentración, fuerza iónica y la presencia de campos magnéticos. También puede variar con la longitud de la nanocelulosa, consecuentemente con su fuente, es así que Beck-Candanedo et al. (2005) observaron pitches entre 7 y 21 nm en muestras de pino y eucalipto, mientras que valores entre 140 y 250 nm han sido reportados para suspensiones obtenidas a partir de tunicados. (Ureña, 2011).

2.12 Electrospinning

La técnica de electrospinning o electro hilado es una técnica relativamente nueva para elaborar fibras ultrafinas. El método de electrospinning permite obtener nanofibras con diámetros que van desde tamaños sub-micrométricos a escalas nanométricas.

El típico montaje para la ejecución de la técnica de electrospinning (figura 2.3), consta de un capilar a través del cual debe ser expulsada la solución polimérica (aguja, cono, etc.); una fuente de alto voltaje que posee dos electrodos los cuales deben conectarse uno al lugar de salida de la solución y otro directamente al plato colector (lamina de metal conductor, mandril rotativo, etc.) donde se depositarán las fibras posterior a la evaporación del disolvente. La técnica puede ser desarrollada de forma horizontal o vertical según se desee. Para impulsar la solución a través del capilar puede utilizarse una bomba de infusión; si se trabaja de forma horizontal, con cono como capilar, la salida de la solución puede estar determinada por la fuerza de gravedad ligada a la viscosidad de la solución. (Duque, 2013).

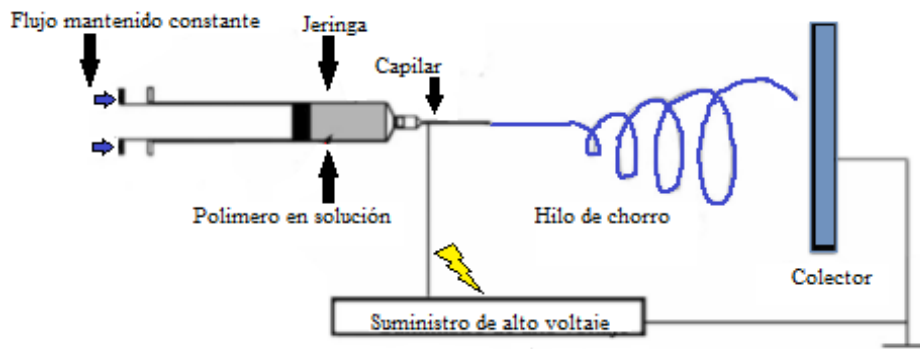


Figura 2.3. Esquema general de la disposición de electrospinning. (Duque, 2013).

El alto voltaje aplicado a través de la aguja crea una inestabilidad termodinámica en la superficie de la solución generando un electro spray conocido con el nombre de “cono de Taylor” el cual se dirige hacia la placa colector; en el trayecto el solvente se evapora y la fibra polimérica se deposita en el colector.

Para el inicio del proceso, el polímero debe estar diluido en el o los disolventes que permitan una dilución completa del mismo (debe ser completa, para evitar taponamiento del capilar durante el proceso) pero que a la vez promuevan la obtención de fibras homogéneas.

Los polímeros son dieléctricos, en presencia de un campo eléctrico pueden considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente, se mantienen en su lugar por acción de las fuerzas atómicas y moleculares, y solo pueden cambiar su posición ligeramente en respuesta a fuertes campos eléctricos externos, lo que explica por qué ocurre el estiramiento de la solución en el proceso. Son llamadas cargas ligadas en contraposición a cargas libres que determinan la conductividad en otro material “conductor”. En ocasiones para incrementar las propiedades dieléctricas de la solución, algunos disolventes con altas constantes dieléctricas son adicionados, esto favorece la formación de fibras con menos estructuras defectuosas (las estructuras defectuosas conocidas como beads, decrecen la superficie por unidad de área del proceso) y con diámetros reducidos.

Una vez se tiene la solución en el lugar (sea jeringa o cono) se inicia la aplicación de alto voltaje, cuando este potencial eléctrico se aplica, las cargas se acumulan promoviendo la formación de una gota en la punta del capilar, a medida que la intensidad del campo eléctrico se incrementa, la gota se alarga para crear una forma cónica conocida como cono de Taylor. La fuerza del campo eléctrico supera las fuerzas de cohesión de la solución, en la mayoría de los casos dominada por la tensión superficial, es así como un chorro de solución de polímero inicia un viaje desde la punta del capilar hasta el plato colector; en su viaje, el chorro de solución polimérica es alargado debido a las interacciones electrostáticas entre las cargas cercanas a segmentos del mismo chorro, mientras tanto, el disolvente se evapora, finalmente, las fibras se solidifican a su llegada al plato colector.

Luego de ser extraídas del plato colector algunos autores sugieren mantener las fibras en vacío para eliminar el disolvente remanente. Es importante tener precaución durante la ejecución del proceso ya que algunos disolventes como el cloroformo, Dimetilformamida y en general aquellos productos químicos nocivos, pueden emitir vapores perjudiciales para la salud, por lo que se recomienda incluir sistemas de ventilación y protección para quienes ejecutan el proceso (Duque, 2013).

2.12.1 Historia del electrospinning

La técnica de electrospinning es una técnica antigua, su origen se remonta a más de 60 años, fue observada por Rayleigh en 1897, quien evaluó el efecto de inducir cargas eléctricas en chorros de agua, así como la inestabilidad asimétrica del flujo del jet. Estudiada en detalle por Zeleny en 1914, a través del análisis del comportamiento de las gotas de solución en el extremo de un capilar y el inicio del proceso de modelamiento matemáticamente del comportamiento de los fluidos bajo las fuerzas electroestáticas y patentada por Cooley, Morton y Formhals; quien en 1934 logró describir de forma explícita el proceso. Para ello trabajó con acetato de celulosa en su primera patente, para su segundo desarrollo ensambló un nuevo sistema con un mayor control de la distancia entre el capilar

y el colector, con el cual redujo de forma considerable los inconvenientes observados en sus primeras investigaciones.

Más adelante investigadores como Reneker 1994 – 1995 profundizaron en la técnica. Solo hasta hace pocos años, debido a la demanda de materiales con dimensiones en escala nanométrica, la técnica de electrospinning se ha convertido en un proceso más atractivo gracias a la habilidad de transformar un amplio rango de materiales en forma de nanofibras a bajo costo y con relativa simplicidad (Duque, 2013).

2.13 Forcespinning

Un nuevo proceso llamado forcespinning se ha desarrollado para fabricar nanofibras a partir de una amplia gama de materiales. Este nuevo método utiliza la fuerza centrífuga, en lugar de la fuerza electrostática como en el proceso de electrospinning.

El método forcespinning utiliza soluciones o materiales sólidos que se disuelven o se funden en nanofibras. Los parámetros clave para controlar la geometría y morfología de las nanofibras incluyen la velocidad de rotación del spinneret, el sistema de colección y la temperatura. Los orificios del spinneret pueden tener formas geométricas arbitrarias para proporcionar una sección transversal correspondiente de nanofibras.

El método forcespinning se ha utilizado con éxito para fabricar nanofibras de óxido de polietileno, ácido poliláctico, bismuto, polipropileno, acrilonitrilo-butadieno-estireno, polivinilpirrolidona y poliestireno, entre otros

En la figura 2.4 se muestra cual es el funcionamiento del forcespinning. La solución se coloca dentro del spinneret, este rota y empuja el material a través de los orificios por medio de la fuerza centrífuga. El material es expulsado en el aire y atenuado en fibras por fuerzas de corte. (Duque, 2013).

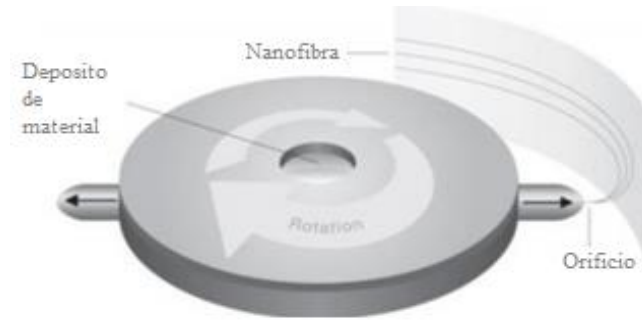


Figura 2.4 Esquema general de la disposición de forcespinning. (Duque, 2013).

3. ANTECEDENTES

La celulosa fue descubierta en 1838 por el químico francés Payen, que la aisló a partir de materia vegetal y determinó su fórmula química. Payen sugirió que las paredes celulares de un gran número de plantas estaban constituidas de la misma sustancia, a la cual le dio el nombre de celulosa. La celulosa es la sustancia orgánica más abundante y el principal componente esencial de las fibras naturales (López, 2004), además se ha caracterizado por poseer propiedades mecánicas que provocan cierto interés a nivel industrial, ya que además de ser biodegradable, también puede ser considerado como materia prima renovable a diferencia de los productos originados del petróleo, los cuales también tienen cierto grado de toxicidad. Por lo anterior, se han desarrollado metodologías para extraer, purificar y caracterizar celulosa a partir de fibras vegetales mediante métodos químicos, tales como la extracción alcalina y blanqueamientos. (Morán, J. 2008).

Las fibras de celulosa, a su vez están formadas por nanofibras de celulosa o fibrillas de nanocelulosa, las cuales forman enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares ya que estas unidades contienen en su estructura tres hidroxilos de alcohol (-OH) que forman uniones de hidrógeno dentro de la misma macromolécula (intramolecular), entre otras macromoléculas de celulosa (intermolecular) y con los grupos hidroxilos provenientes del aire. (Espitia, 2010)

Por este motivo, todas las fibras de origen vegetal son de naturaleza hidrófila, alcanzando un contenido de humedad del 8 al 12.6 %, lo anterior provoca una fuerte tendencia a asociarse entre sí, lo cual es en sí el fundamento de la resistencia de las hojas de papel, de modo que estos enlaces tienen una gran importancia en lo que respecta a la morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad de las cadenas celulósicas. Dichas interacciones también pueden causar que las partículas de nanocelulosa se agreguen durante la preparación de un nano compuesto y por lo tanto limitar sus características, de ahí que se realicen estudios en relación a la utilización de estos compuestos y sus características para su posterior aplicación industrial. (Espitia, 2010).

La nanocelulosa a su vez está formada por una estructura microcristalina compuesta por una parte cristalina y una parte amorfa, a partir de la cual se han identificado dos formas de nanocelulosa principalmente, los “Whiskers” o nanocristales de celulosa y las nanofibrillas o celulosa nano fibrilada ya mencionada, los cuales presentan características distintas, las primeras son la parte cristalina separada del resto de la celulosa, presentando un tamaño de 3-10 nm de diámetro y 100-300 nm de longitud, mientras que las microfibrillas están formadas por dominios cristalinos y amorfos alternados entre sí, que se obtienen al separar las largas nanofibrillas que forman a su vez como se mencionó anteriormente las fibras de celulosa presentando tamaños que van de 5-50 nm y unos cuantos micrones de grosor (Mittal, 2013; Khalil *et al.*, 2014).

Parte de las técnicas usadas para la obtención de nanofibrillas de celulosa provienen de las técnicas utilizadas ampliamente para la obtención de celulosa a partir de residuos de diversas especies agrícolas de la familia de las Platanáceas (Cordeiro *et al.*, 2004), técnicas que a su vez son muy similares a los ya usados en la industria papelera, los cuales generalmente están diseñados para materiales con alto contenido de lignina, un ejemplo es el del proceso desarrollado en el Centro Público que realiza Investigación Científica y Tecnológica (CICY) para la obtención de celulosa a partir de fibras vegetales (Cazaurang *et al.*, 1990) y que consiste en un proceso de cuatro etapas: hidrólisis ácida, cloración, hidrólisis alcalina y un blanqueo.

En este sentido, se pueden mencionar otros estudios recientes en los que se han utilizado plátano (*Platanus spp.*), y coco (*Cocos nucifera*) en la extracción de nanofibrillas de celulosa para estudiar sus propiedades mecánicas y estructurales, así como su aplicación potencial a nivel industrial.

- Plátano (*Platanus spp.*)

En el estudio de Cherian *et al.*, (2008) se describe la técnica utilizada para la extracción de nanocelulosa a partir del plátano, la cual consiste en la obtención de fibras de plátano como materia prima, la cual en principio fue picada en pedazos de hasta 10 cm y pre tratada con NaOH al 2% dentro de una autoclave y mantenida a 20 lb de presión durante 1h, una vez

pasado ese tiempo, las fibras se lavaron con agua. Posteriormente se llevó a cabo el blanqueamiento mediante una mezcla de NaOH y ácido acético y una mezcla de hipoclorito de sodio, lo cual se repitió en 6 ocasiones, después del cual las fibras se lavaron con agua destilada y se secaron. Después del blanqueamiento, las fibras fueron tratadas con ácido oxálico en diferentes concentraciones dentro de una autoclave a 20 lb de presión durante 15 minutos, liberando la presión y repitiendo el proceso 8 veces, para finalmente lavar las fibras nuevamente hasta eliminar por completo el ácido. Posteriormente, las fibras obtenidas fueron suspendidas en agua bajo constante agitación durante 4 horas y se pusieron a secar en un horno a 90°C, con lo cual se llevaron a cabo los análisis para caracterizar las fibrillas sintetizadas, a partir de lo cual los autores concluyeron que el método antes descrito representa una opción fiable para la obtención de nanofibrillas de celulosa.

En esta misma línea de investigación, Cordeiro *et al.*, (2013) usaron la metodología antes descrita por Cherian *et al.*, (2008) denominada explosión de vapor acoplada a tratamiento ácido y básico para la obtención de nanowhiskers de celulosa para identificar el efecto de un tratamiento saponificante en una superficie de micro y nanofibrillas de plátano para evaluar la influencia de la modificación a nivel químico de las fibras, de modo que el comportamiento de las nanofibrillas de celulosa pueda mejorar al momento de ser usadas para producir polímeros y compuestos a partir de los mismos.

En otro estudio realizado por el mismo procedimiento llevado a cabo por los artículos previamente mencionados es utilizado para sintetizar y caracterizar fibras de nanocelulosa mediante explosión al vapor como pretratamiento para fraccionar el material lignocelulósico en los constituyentes de un polímero, esto debido a que dicho proceso en principio se utilizó para desfibrar la madera en fibras para la producción de tablas debido a que al someter a alta presión el material durante cortos periodos de tiempo, seguido de descompresiones repentinas (explosión) conlleva a que la biomasa se “fibrerice” o forme capas por acción mecánica y de los químicos usados, de modo que durante este proceso el material es expuesto a vapor presurizado, seguido de una rápida reducción de la presión, resultando en un rompimiento sustancial de la estructura lignocelulósica, así como de la

hidrólisis de la fracción de hemicelulosa, despolimerización de los componentes de la lignina y desfibrilación.

Además del método antes mencionado para la síntesis de nanofibrillas de celulosa a partir del plátano, en el estudio comparativo de Tibolla *et al.*, (2014) entre el método químico y enzimático se utilizó la cáscara del plátano inmaduro para determinar qué método es el más viable para la producción de nanofibras de celulosa, esto mediante la producción en primer lugar de un salvado, el cual se hizo mediante la colocación de dicha cáscara en una solución de metabisulfito de potasio al 1% durante 24 h para inhibir el proceso oxidativo, seguido de lo cual las cáscaras fueron secadas durante 24 h, con lo cual el producto ya seco fue molido y lavado con etanol para remover la fracción lipídica y vuelto a secar, a partir de lo cual el material resultante fue tamizado a través de un tamiz de 200um para separar micropartículas, con las cuales se llevó a cabo el tratamiento químico para aislamiento de las nanofibras con el objetivo de eliminar los componentes no celulósicos como pectinas, hemicelulosa y lignina, mediante el cual el salvado fue tratado con una solución de KOH al 5% para solubilizar la hemicelulosa y pectinas.

El residuo insoluble posteriormente fue delignificado con una solución de NaClO_2 pH 5 al 1% a 70°C durante 1 h. Posteriormente se llevó a cabo un blanqueamiento con el cual se rompen los compuestos fenólicos o moléculas que presentan grupos cromóforos en la lignina, removiendo así los subproductos de la misma ruptura, además de blanquear la pulpa, para finalmente llevar a cabo la hidrólisis ácida con una solución de H_2SO_4 para remover trazas minerales e hidrolizar la celulosa amorfa, dando como resultado las nanofibrillas.

Por otro lado, el tratamiento enzimático consistió en la misma deslignificación del salvado previamente preparado con KOH antes mencionado, después de lo cual el residuo fue sometido a lavados sucesivos con agua desionizada seguido de una centrifugación después de cada lavado a 10,000 rpm a 5°C durante 15 minutos a partir de lo cual la hidrólisis enzimática se llevó a cabo con un buffer de acetato pH 5 y xilanasa, esto con el fin de remover la fracción de hemicelulosa en la fibra de la cáscara del plátano, lo cual además

ataca las regiones amorfas, la xilanasa ayuda en la ruptura de los enlaces beta1-4 glucosídicos, aislando así las nanofibrillas de celulosa.

Finalmente la pulpa fue lavada separada por centrifugación resultando así una suspensión coloidal. Una vez obtenidas ambas muestras por dos métodos distintos, los autores caracterizaron los compuestos y concluyeron que el tratamiento químico fue más eficaz en la eliminación de las regiones amorfas y en la producción de celulosa nanocristalina en comparación con el método enzimático.

En cuanto al plátano, además de la utilización tanto de los tallos como de las cáscaras de los mismo, también se han utilizado solamente residuos para la producción de nanocelulosa con el objetivo de generar nanocompuestos, un ejemplo de esto es el estudio realizado por Ibrahim *et al.*, (2010) en el cual se realizaron dos tipos de extracciones, uno a partir del tratamiento alcalino de la pulpa, y el otro mediante la explosión al vapor con el objetivo de usar las fibras obtenidas para reforzar una matriz de polietileno. En el primero se extrajo la pulpa de la materia prima con NaOH al 10% en una autoclave rotatoria con el objetivo de obtener fibra de plátano. En segundo lugar se llevó a cabo la técnica de explosión de vapor a partir de lo cual se obtuvieron las microfibrillas de celulosa, las cuales posteriormente fueron tratadas con anhídrido maleico con el objetivo de mejorar la compatibilidad de las fibras y microfibrillas producidas con la matriz de polietileno.

A partir de las pruebas realizadas a la matriz, los autores concluyeron que el uso de residuos de plátano pueden producir nanocelulosa compatible con la matriz polimérica, sin embargo se encontraron algunas diferencias entre los tratamientos, ya que al añadir el anhídrido málico, las fibras de explosión de vapor disminuyeron su tamaño en comparación con las de la pulpa además de presentar, mayor cristalinidad, así como un mayor contenido de lignina, lo cual a su vez facilita la dispersión de la fibra en la matriz polimérica, lo que resulta en una mayor fuerza de tensión y un mayor grado de cristalinidad en el compuesto resultante.

- Coco (*Cocos nucifera*)

En otros estudios se ha empleado la fibra de coco para la producción de nanomateriales, un ejemplo es el estudio realizado por Rosa *et al.* (2010) en el que se obtuvo celulosa nanocrystalina a partir de la fibra de coco, para lo cual dicha fibra fue pre-tratada con una solución alcalina para eliminar impurezas, y posteriormente cortada y tamizada con una malla del 40, obteniéndose así 100 g de material para disolver en agua destilada con la ayuda de una licuadora. La suspensión de la fibra obtenida se agitó durante 2h a 50°C y filtró, para posteriormente dispersar el residuo en NaOH al 2% con agitación constante, seguido de esto los residuos fueron secados para llevar a cabo la deliginación parcial o blanqueamiento para facilitar la extracción de los nanocristales.

Posteriormente, los nanocristales son obtenidos por hidrólisis ácida al tratar las fibras blanqueadas con una solución de ácido sulfúrico. Después del tratamiento la celulosa hidrolizada fue lavada para separar los cristales de la solución por centrifugación y separada por diálisis hasta obtener un pH constante, con lo cual el precipitado fue dispersado en agua para obtener una suspensión que se caracterizó mediante microscopía electrónica, difracción de rayos X y análisis termogravimétrico, con lo cual los autores concluyeron que para la obtención de nanocristales a partir de fibras de coco, el blanqueamiento menos agresivo es el más recomendable y que la lignina residual puede ayudar con la compatibilidad de este material y las matrices poliméricas hidrofóbicas.

En otro estudio realizado por De Figueiredo *et al.*, (2012), conociendo la problemática existente en Brasil en relación con los residuos de coco, se analizó la producción de celulosa nanocrystalina a partir de fibras de coco inmaduras, así como de algodón para identificar el impacto ambiental del proceso. En este caso se utilizó la metodología propuesta por Rosa *et al.*, (2010).

4. METODOLOGÍA

La metodología que se desarrolló en el presente trabajo de tesis se bosqueja en el diagrama que se presenta en la figura 4.1 y se divide en 3 fases, las cuales se describen a continuación.

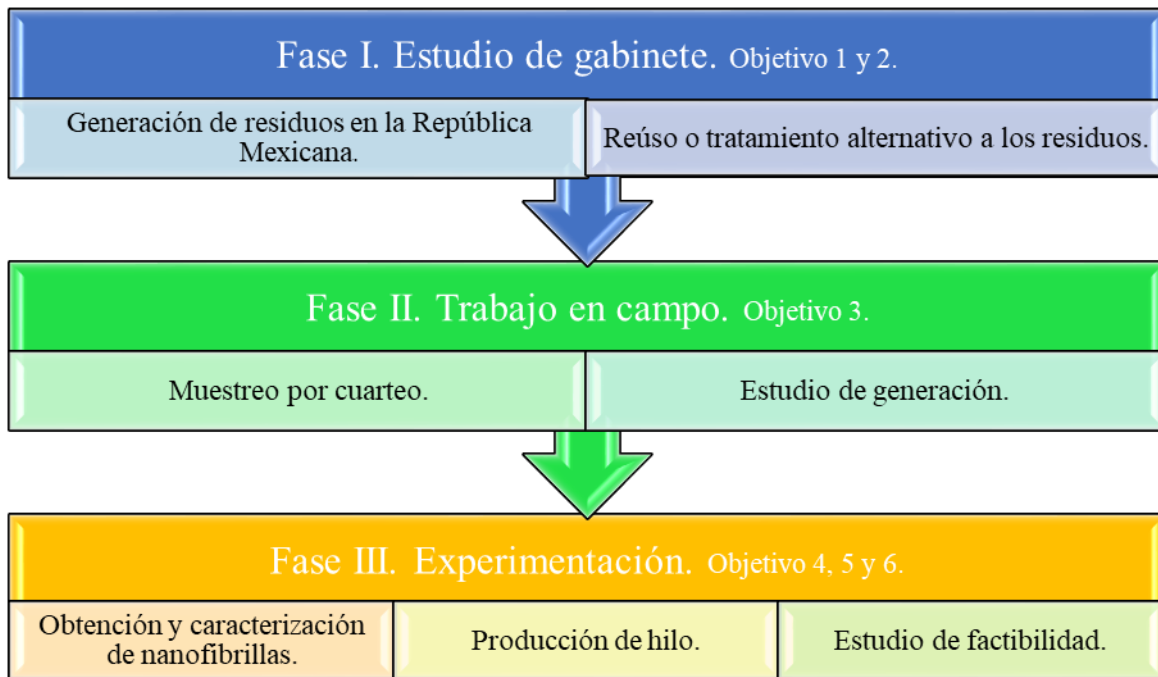


Figura 4.1. Diagrama de la metodología

4.1 Fase I. Estudio de gabinete

En esta etapa se recopiló la información necesaria para establecer la base teórica que dio sustento a la investigación, y así cumplir con los objetivos particulares 1 y 2 del presente trabajo. Como soporte teórico se buscó información sobre:

- Generación de residuos sólidos orgánicos de plátano y coco en la República Mexicana y en la central de abasto de la Ciudad de México.

- Manejo Integral de residuos sólidos orgánicos de plátano y coco en la República Mexicana y en la central de abasto de la Ciudad de México.
- Reúsos, reciclaje o tratamientos alternativos que se le proporcionan a los residuos de plátano y coco en la actualidad.

4.2 Fase II. Trabajo en campo.

Se hicieron los muestreos necesarios para obtener los residuos orgánicos en la central de abasto de la Ciudad de México, cumpliendo así con el objetivo particular número 3 de la sección 1.2 de este trabajo.

Se trabajó con los residuos generados del pinzote de plátano de la variedad Macho (*Musa balbisiana*), ya que es el que más demanda tiene. En el caso del coco (*Cocos nucifera*) se trabajó con el mesocarpio del coco proveniente del estado de Guerrero. Ambos productos se venden en mayoreo y menudeo en la central de abasto de la Ciudad de México, Delegación Iztapalapa.

La metodología que se usó es la determinada en la Norma Mexicana NMX-AA-15-1985. Protección al ambiente –Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales – Muestreo – Método de cuarteo.

4.3 Fase III. Experimentación

En esta última fase se cumplieron los objetivos particulares del 4 al 6 que se especifican en la sección 1.2 del presente trabajo. Se trabajó en laboratorio en los siguientes análisis:

4.3.1 Análisis morfológico de los residuos.

Se realizó el análisis químico proximal y de paredes celulares en el laboratorio de nutrición animal y bioquímica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.

Método AOAC Químico proximal:

- Materia seca.
- Humedad.
- Proteína cruda.
- Extracto etéreo.
- Cenizas.
- Fibra cruda.
- Extracto libre de nitrógeno.
- Nutrientes digestibles totales (T.N.D.)
- Energía digestible (E.D.) kcal/kg.
- Energía metabolizable (E.M.) kcal/kg.

Análisis de fracciones de la fibra (Van Soest):

- Fibra neutro detergente.
- Contenido celular.
- Fibra ácido detergente.
- Hemicelulosa.
- Celulosa.
- Lignina.

4.3.2 Obtención de nanofibrillas de coco

El procedimiento de obtención de nanofibrillas constó de tres pasos: pre-lavado del gabazo de coco para reducir la cantidad de lignina, ceras y otras impurezas de la misma fibra, seguido de un tratamiento para blanquear las fibras pre-lavadas y finalmente se obtuvieron las nanofibrillas mediante una hidrólisis ácida.

Pre-lavado

Para la síntesis de nanocelulosa primero se llevó a cabo un pretratamiento de lavado, para lo cual fue necesario que el material a usar, en este caso el mesocarpio de coco, se secase,

se triturara y se cortara lo más fino posible, para este primer paso se requirieron 100 g del material de interés, los cuales posteriormente se lavaron con agua destilada por 10 minutos, luego con agua a 50°C por 2 horas, después de filtrarse se repitió el proceso dos veces. Al residuo se le disperso en 500 mL de solución NaOH 2% por 2 horas a 80°C, se filtró y lavo con agua destilada. El tratamiento con NaOH se repitió una vez más para mayor remoción de impurezas. Finalmente, las fibras resultantes se secaron a 50°C por 24 horas.

Blanqueamiento

En segundo lugar, 5 g del extracto obtenido se blanqueó con 150 mL de una solución de 1.5 g de clorito de sodio NaClO₂ y 8-10 gotas de ácido acético glacial a una temperatura entre 60 y 70°C, dicha mezcla se agito en intervalos constantes de una hora y después se enfrió en una tina con hielo, filtrado y lavado nuevamente con agua. Al final la pasta obtenida se trató con una solución de ácido nítrico 0.05N por una hora a 70°C y tamizadas en una malla de tamizado de 120µm y posteriormente se realizó un lavado con agua.

A continuación, se realizó un tratamiento alcalino con una solución de NaOH 0.1M a 45°C por 3 horas. Seguido de esto se realizaron tratamientos sucesivos con H₂O₂, en los porcentaje volumen siguientes: 0.5%, 1%, 2%, 3% a 45°C por 15 horas en total y un pH de 11.5. Seguido de esto se realizó un tratamiento alcalino con solución NaOH 10% m/v y Na₂B₄O₇ 1% m/v a 28°C por 15 horas. Finalmente se realizó un tratamiento ácido con una solución de CH₃ (COOH) 80% v/v y HNO₃ 70% v/v en una relación 10:1 a 120°C por 15 minutos.

Hidrólisis ácida

Una vez terminado el pre-lavado y el blanqueamiento de las fibras, se llevó a cabo una hidrólisis ácida a partir de una solución de ácido sulfúrico concentrado al 64% durante 30 minutos a 45°C con agitación continua. Es importante hacer notar que entre mayor sea la proporción de nanofibrillas, mejor es la dispersión y estabilidad en un medio acuoso, en este caso la hidrólisis se realizó en una proporción de 1-10 g de pulpa por mL de ácido. Después de transcurrido el tiempo necesario para que la hidrólisis se llevara a cabo, la pulpa resultante se lavó y centrifugo durante 10 minutos a una velocidad de 10,000 rpm,

obteniéndose así un precipitado. El precipitado resultante fue continuamente dializado con agua por 3 días hasta que se alcanzó un pH constante.

En la figura 4.2 se hace un resumen del procedimiento para la obtención de nanofibrillas de coco.

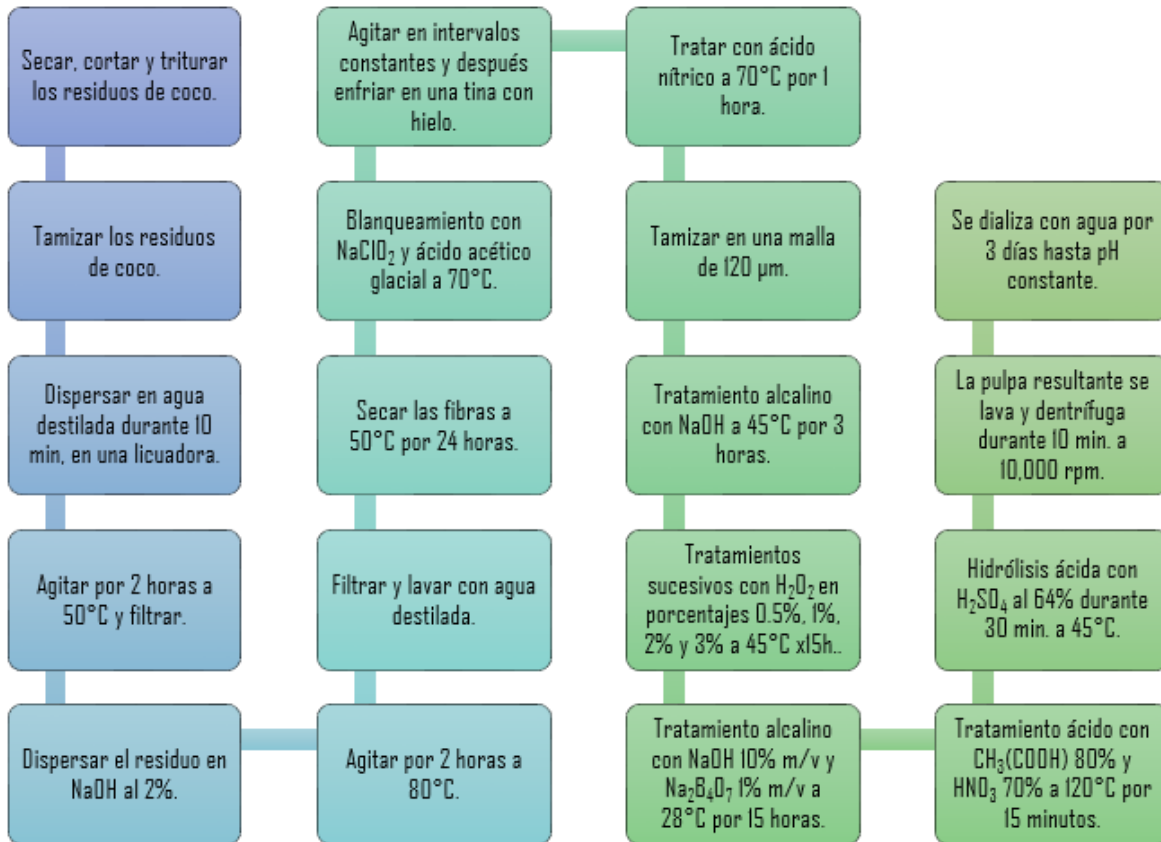


Figura 4.2. Método para la obtención de nanofibrillas de residuos de coco.

4.3.3 Obtención de nanofibrillas de plátano

Pre-tratamiento

Se redujo el pinzote a secciones de 30 cm, se lavó con agua y corto las fibras a 2 cm de largo. Finalmente se secó a 105°C por 14 horas.

Preparación de la celulosa

Se realizó un tratamiento alcalino con NaOH al 15% p/v, por 100 minutos de cocción bajo agitación continua. De esta manera se removió la lignina por reacciones de hidrólisis que permiten su solubilización, liberando las fibras de celulosa.

Se lavó con agua destilada y filtró hasta alcanzar pH neutro. Se obtuvo en esta etapa celulosa con residuos de lignina y licor negro producto de la digestión de diferentes compuestos orgánicos, dentro de ellos la lignina, mezclados con reactivos consumidos.

Para remover la lignina residual, se hizo un blanqueamiento con NaClO al 0.5%, por 1 h a 70 °C. Se filtró y lavó con agua destilada caliente hasta pH neutro. Al final se secó a 80 °C.

Obtención de nanofibrillas

Se tomaron 10 g. de celulosa para hidrolizarlos con 83 mL de H₂SO₄ al 61% p/v por 90 minutos y a 45°C. La suspensión coloidal lechosa obtenida se lavó con agua destilada usando ciclos repetidos de centrifugación de 10 a 3500 rpm, hasta alcanzar un pH de entre 3 y 5.

En la figura 4.3 se explica un resumen del procedimiento para la obtención de nanofibrillas a partir de los residuos de pinzote de plátano.

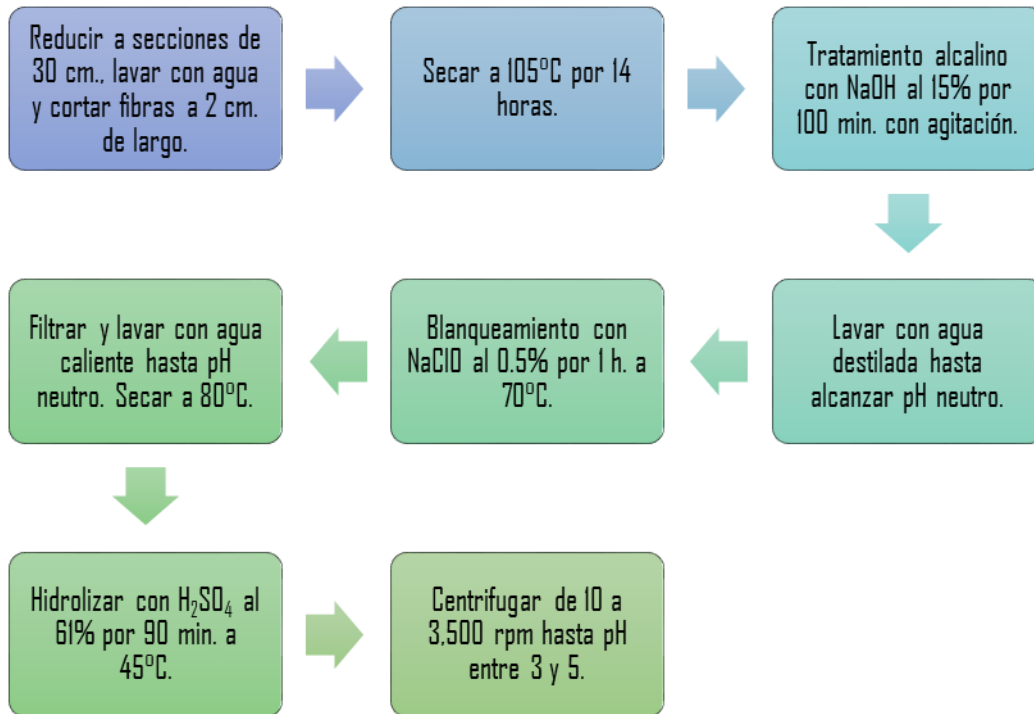


Figura 4.3. Método para la obtención de nanofibrillas a partir de los residuos de plátano

4.3.4 Caracterización de las nanofibrillas obtenidas

Se realizaron los análisis de microscopía electrónica de barrido en las nanofibrillas obtenidas en el paso anterior. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME) del Instituto de Investigaciones de los Materiales de la UNAM.

4.3.5 Producción de hilo.

Con el material obtenido de nanofibrillas de celulosa de pinzote de plátano y de fibra de coco, se procedió a la elaboración del hilo mediante el uso de equipo electrospinning y forcespinning, en el Centro de Innovación en Diseño y Tecnología (CIDyT) del ITESM.

Primero se determinó el porcentaje en peso entre 12 y 16% del material en cuestión (nanofibrillas de celulosa de pinzote de plátano y de fibra de coco) para diluir en una

solución a base del líquido iónico acetato de 1-etil-3-metilimidazolio y N, N-Dimetilformamida; durante 12 horas a 45°C y agitación continua.

Posteriormente, a esta disolución se le agregó el 99% en peso de una solución de PCL/Acetona y se dejó en agitación continua durante 3 horas a 45°C. La solución resultante se introdujo en una jeringa de 5 mL para utilizarse en el equipo de electrospinning; variando flujo, voltaje y distancia del colector para obtener el hilo deseado.

4.3.6 Evaluación de factibilidad técnica-económica y ambiental.

Se realizará una evaluación de factibilidad descriptiva con los parámetros que se mencionan en la figura 4.4.

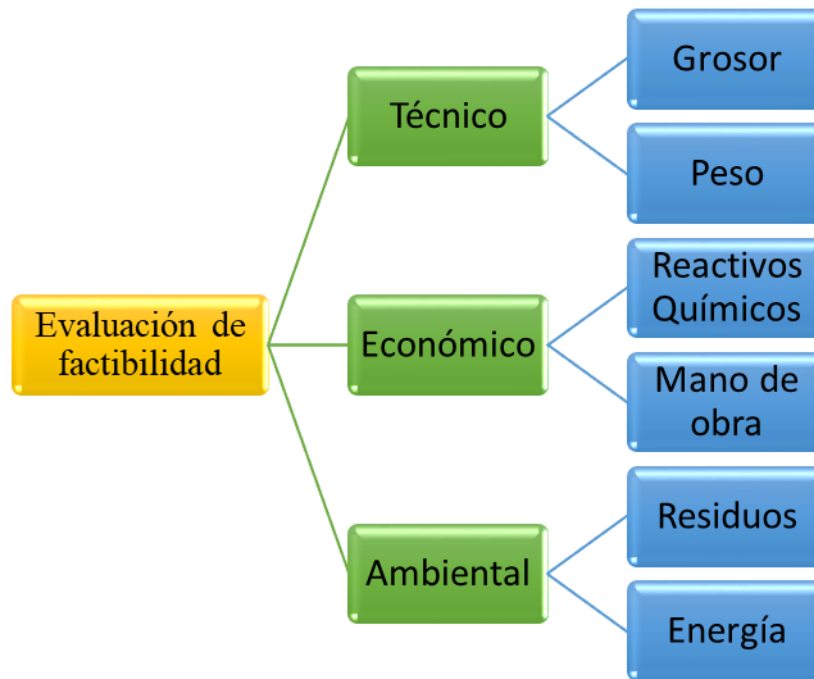


Figura 4.4 Parámetros de la evaluación de factibilidad del estudio

4.3.6.1 Evaluación técnica

La evaluación de factibilidad técnica se realizó basándose en los parámetros de grosor y peso de las fibras obtenidas en electrospinning.

Posterior a calcular el grosor y peso de las fibras; se fabricó un huso para hilar utilizando una vara de madera de un diámetro aproximado de 1 mm, 2 cd's, un gancho y una goma de plástico.

El primer paso para la fabricación del huso fue atornillar el gancho en uno de los extremos de la vara de madera. Se utilizó la goma de plástico para colocarse en el hueco ubicado en el medio de ambos cd's, para así tener ambos discos unidos y generar un mayor peso. Por último, la vara se introdujo por el medio de la goma y los discos quedaron colocados en el extremo contrario al gancho. En la figura 4.5 se muestra el huso que se fabricó.



Figura 4.5 huso para hilar

Colocando un extremo de las fibras obtenidas por electrospinning en el gancho, con ayuda de unas pinzas para mejor agarre, se procedió a girar los discos para que el movimiento de rotación hilara las fibras obtenidas y produjera el hilo deseado.

El grosor del hilo obtenido se midió con ayuda de un vernier marca Foy con un rango de 15 cm y para el peso se utilizó una balanza analítica.

4.3.6.2 Evaluación económica

Los parámetros a evaluar en el estudio de factibilidad económica fueron el precio de los reactivos químicos utilizados en la obtención de las nanofibrillas y la fabricación del hilo por electrospinning.

La mano de obra se cuantificó mediante horas hombre.

4.3.6.3 Evaluación ambiental

En la evaluación ambiental se calculó la cantidad de residuos generados durante los procedimientos realizados y se dio un tratamiento adecuado a cada tipo de residuo, el cual se siguió de acuerdo a la normativa del Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La energía se calculó con respecto al tiempo que se utilizó cada uno de los equipos que fueron usados durante ambos procedimientos de obtención de nanofibrillas y fabricación de hilo.

5. RESULTADOS

5.1 Generación de residuos sólidos orgánicos de plátano y coco.

El apropiado manejo y gestión de los residuos sólidos orgánicos de la industria agrícola en México es prácticamente inexistente. Existe una gran generación de estos residuos y la práctica que realizan comúnmente los productores para deshacerse de ellos es la quema; lo que en sí mismo produce otra gran problemática ambiental.

Cumpliendo con el objetivo 1 del presente trabajo, en la figura 5.1 se muestra la comparación de la producción del cultivo de plátano contra la generación de residuos de este cultivo. Las toneladas cosechadas del plátano en el 2016 fueron de 2, 150,519.90, según fuente de la SAGARPA. El peso del fruto cosechado fue de 430,103.98 toneladas; mientras que los residuos fueron de 1, 720,415.92 toneladas.

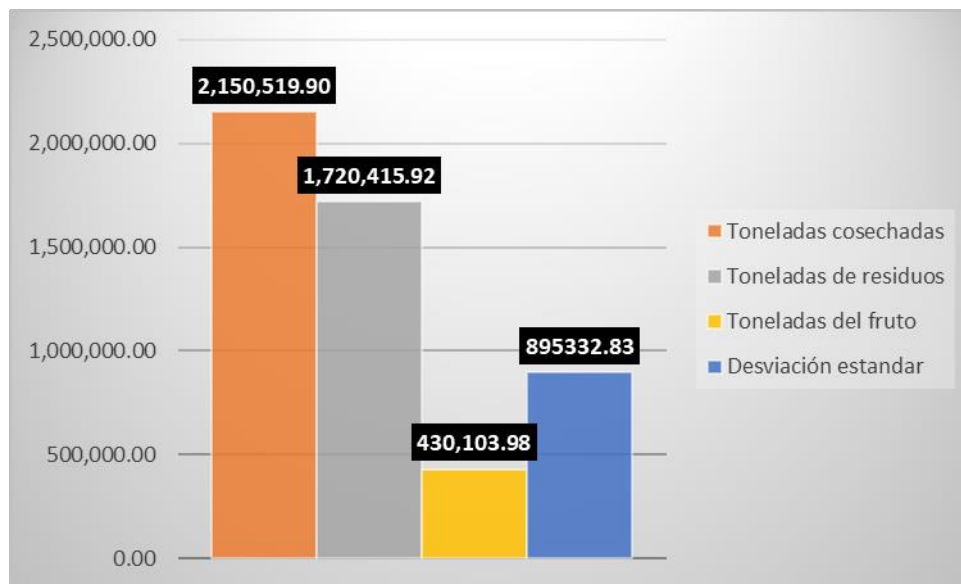


Figura 5.1 Residuos generados del cultivo de plátano

En la figura 5.2 se muestra la misma comparación de toneladas cosechadas y toneladas de residuos con respecto al cultivo de coco. Se cultivaron 178,832.88 toneladas de coco en el

2014, de las cuales 62,591.51 toneladas equivalen al peso del mesocarpio y 116,241.37 toneladas al endocarpio.

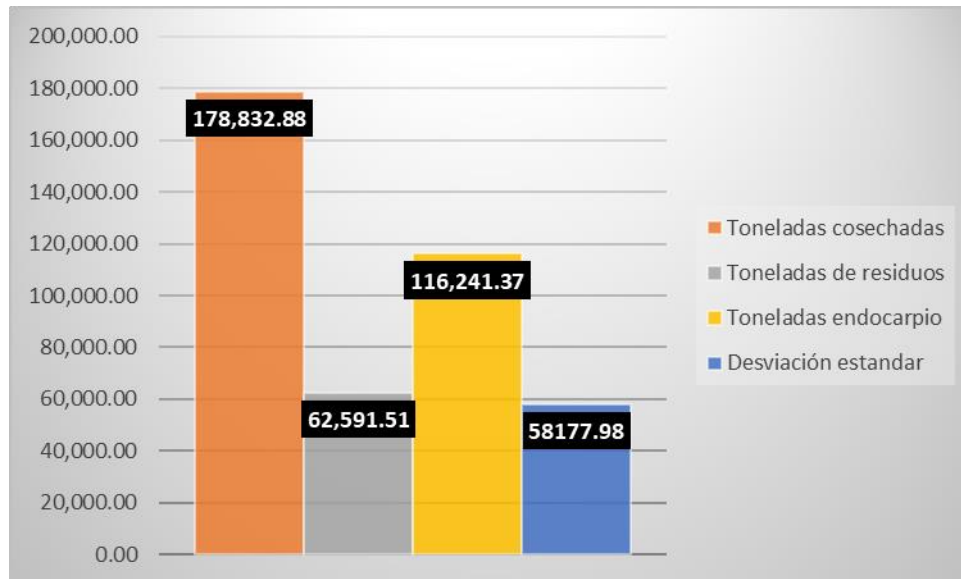


Figura 5.2 Residuos generados del cultivo de coco

En la actualidad se generan grandes cantidades de estos residuos; esta problemática no solo se evidencia en la ciudad de México, sino también en numerosas zonas de la República Mexicana. A pesar de eso, a menudo resulta invisible para muchos, por lo que no es de extrañar que haya sido poco estudiada, tanto desde las vertientes sociales, ambientales como jurídicas.

La mala gestión de estos residuos supone un problema ambiental, que origina un deterioro progresivo y acumulativo del entorno, lo que puede constituir, en ciertos casos, en un problema de higiene pública.

5.2 Reúso alternativo de los residuos sólidos orgánicos de plátano y coco.

Para el objetivo 2, los residuos de plátano en los que se enfocó el presente trabajo fueron pseudotallo y raquis o pinzote. El pseudotallo es uno de los residuos que más se genera en

volumen, convirtiéndose en un inconveniente tanto ambiental como para el mismo cultivo. Algunos de los reúsos alternativos que se le da actualmente son para la elaboración de ropa, cordones, hilos, forros interiores de vehículos y en la fabricación de papel. Por otro lado, el raquis o pinzote comúnmente se utiliza como alimento para ganado, pero también se ha venido utilizando en forma de harinas con el mismo fin; también pueden ser fuente de materiales fibrosos como papel, materiales de construcción y artesanías.

La fibra de coco tiene múltiples usos a su vez, pero de interés para el presente trabajo son los usos que se le dan en la industria textil. Como son la fabricación de cordeles, tapetes, esteras y material de relleno.

En la figura 5.3 se resumen las alternativas de reúsos que se mencionaron en el capítulo 2 del presente trabajo.

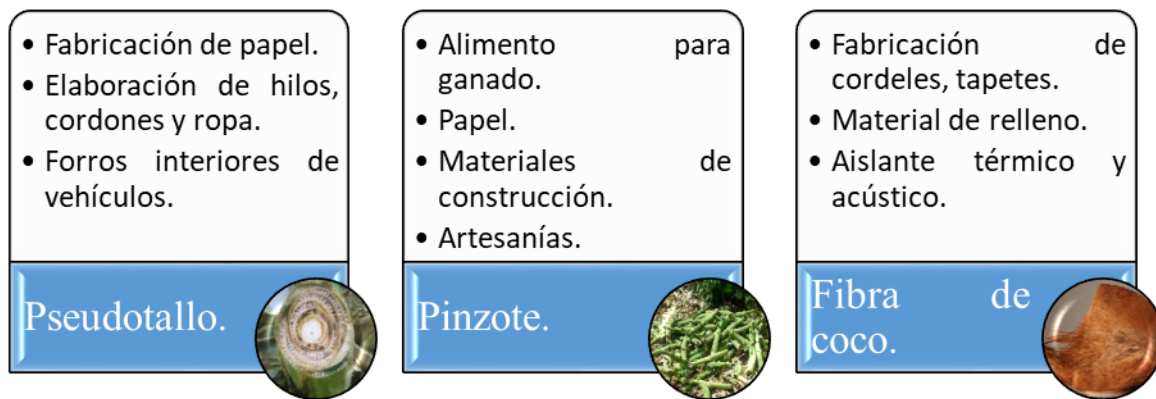


Figura 5.3 Reúsos alternativos de los residuos de coco y plátano.

5.3 Muestreo aleatorio basado en el método de cuarteo.

En las figuras 5.4 y 5.5 se muestran los resultados del muestreo por método de cuarteo realizado con los residuos de plátano y de coco de la central de abasto de la Ciudad de México, cumpliendo así con el objetivo 3 del presente trabajo.



Figura 5.4 Método de cuarteo con residuos de pinzote de plátano



Figura 5.5 Método de cuarteo con residuos de cáscara de coco

El plátano macho es el único que llega a la central de abastos con pinzote, las demás variedades llegan sin él, cortados por racimos y en cajas. Existen alrededor de 18 puestos que manejan plátano macho y generan de 500 kg a 200 kg diarios, es decir, más de 6 toneladas diarias que se llevan a disposición final y que no son separados entre residuos orgánicos e inorgánicos.

En el caso del coco, la central de abastos sólo cuenta con 4 puestos en total que se dedican a la compra-venta de coco; y sólo 3 de ellos generan residuos de cáscara de coco en el sitio.

Los residuos son colectados en rejillas de plástico de 1 metro de largo, al día se generan un promedio de 10 rejillas por puesto; dando un peso total de 300 kg/día de residuos de coco.

5.4 Análisis de los residuos de plátano y coco y obtención de las nanofibrillas.

Como ya se mencionó en la metodología, para cumplir con el objetivo número 4, se realizaron análisis a los residuos de pinzote de plátano y de coco y posteriormente se realizó la obtención de las nanofibrillas a partir de estos residuos.

5.4.1 Análisis de los residuos.

Se realizó en el laboratorio de nutrición animal y bioquímica, los análisis de química proximal y de fracciones de la fibra en los residuos de coco y plátano.

5.4.1.1 Análisis de fracciones de la fibra.

Tabla 5.1 Resultados en porcentaje de fracciones de la fibra de plátano

Fracción	Porcentaje
Fibra neutro detergente	64.28%
Contenido celular	35.72%
Fibra ácido detergente	48.09%
Hemicelulosa	16.19%
Celulosa	39.94%
Lignina	11.01%

Tabla 5.2 Resultados en porcentaje de fracciones de la fibra de coco

Fracción	Porcentaje
Fibra neutro detergente	81.36%
Contenido celular	18.64%
Fibra ácido detergente	70.80%
Hemicelulosa	10.56%
Celulosa	28.72%
Lignina	40.25%

El total de la fibra está contenido en el NDF (Fibra neutro detergente) o paredes celulares. Esta fracción contiene celulosa y lignina. El NDF suministra la mejor estimación del contenido total en fibra del residuo. De acuerdo a los resultados que se muestran en la tabla 5.1 y 5.2, de plátano y coco respectivamente, el porcentaje de NDF es alto.

Por otra parte, la fibra ácido detergente (ADF) consiste primariamente de celulosa, lignina y hemicelulosa. Con estos análisis se puede observar que ambos residuos cuentan con un alto grado de ADF.

5.4.1.2 Análisis de química proximal.

Tabla 5.3 Resultados de química proximal de residuos de plátano

Parámetro	B.H.	Base 90	Base 100
Materia seca	6.38%	90.00%	100.00%
Humedad	93.62%	10.00%	0.00%
Proteína cruda (Nitrógeno *6.25)	0.38%	5.35%	5.94%
Extracto etéreo	0.11%	1.56%	1.74%
Cenizas	1.53%	21.61%	24.01%
Fibra cruda	1.53%	21.56%	23.95%
Extracto libre de nitrógeno	2.83%	39.92%	44.35%
T.N.D.	3.40%	47.90%	53.22%
E.D. kcal/kg (aproximadamente)	149.69	2111.76	2346.40
E.M. kcal/kg (aproximadamente)	122.73	1731.46	1923.85

Tabla 5.4 Resultados de química proximal de residuos de coco.

Parámetro	B.H.	Base 90	Base 100
Materia seca	80.83%	90.00%	100.00%
Humedad	19.17%	10.00%	0.00%
Proteína cruda (Nitrógeno *6.25)	1.68%	1.87%	2.08%
Extracto etéreo	2.34%	2.61%	2.90%
Cenizas	2.28%	2.54%	2.82%
Fibra cruda	28.33%	31.55%	35.05%
Extracto libre de nitrógeno	46.20%	51.44%	57.16%
T.N.D.	54.82%	61.04%	67.82%
E.D. kcal/kg (aproximadamente)	2417.04	2691.08	2990.09
E.M. kcal/kg (aproximadamente)	1981.76	2206.46	2451.62

Para el presente estudio, los elementos de interés de este último análisis es la cantidad de humedad y materia seca presente en los residuos. En las tablas 5.3 y 5.4 se pueden observar los resultados obtenidos de los residuos de plátano y coco respectivamente, en base húmeda, y en base seca a 90% y 100%.

La humedad es la cantidad de agua que contiene el alimento; la diferencia entre el peso total del alimento y el contenido en agua se denomina materia seca. En materia seca y humedad se puede observar que los residuos de pinzote de plátano contienen mayor humedad que los residuos de coco. Los residuos de pinzote de plátano en su mayoría es agua, contando solo con un 6.38% de peso de materia seca y 93.62% en humedad.

5.4.2 Obtención de nanofibrillas de plátano

Se tomaron 300 gramos de residuos de pinzote de plátano cortados en secciones de 30 cm y posteriormente en fibras de 2 cm de largo como se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6. Pinzote en secciones de 30 cm

Se desfibraron los pinzotes manualmente y se colocó la fibra obtenida en proceso de secado (figura 5.7) para posteriormente realizar el tratamiento alcalino para obtener celulosa con residuos de lignina y licor negro (figura 5.8).



Figura 5.7. Fibras de plátano en proceso de secado



Figura 5.8. Licor negro

Seguido de esto se realizó un blanqueamiento para así obtener 3.96 g de celulosa (figura 5.9) de 100 g de plátano.



Figura 5.9. Celulosa de plátano

Usando ciclos repetidos de centrifugación de 10 a 3500 rpm (figura 5.10) en una centrífuga refrigerada Avanti J-26S XPI se obtuvo 0.72 gramos de celulosa libre de lignina residual.



Figura 5.10. Celulosa de pinzote centrifugada y seca

5.4.3 Obtención de nanofibrillas de coco

En la figura 5.11 se muestra la fibra de coco que se secó posteriormente a su triturado, ya que para iniciar todo el procedimiento experimental era necesario que la fibra tuviera un bajo contenido de humedad para facilitar la extracción de celulosa.



Figura 5.11. Fibra de coco seca

En la figura 5.12 y la figura 5.13 se observa la fibra obtenida después de someterla a todo el tratamiento de blanqueado e hidrólisis para la obtención de celulosa. Como se especificó en la metodología experimental, únicamente 5 g de la muestra pre-lavada se sometieron al proceso de blanqueamiento para posteriormente hidrolizarlas en medio ácido.



Figura 5.12. Fibra de coco obtenida después de la hidrólisis ácida



Figura 5.13. Fibra de coco después de dializar por tres días

5.5 Caracterización de las nanofibrillas obtenidas.

Se realizó un análisis morfológico de las nanofibrillas obtenidas por medio de microscopía electrónica de barrido. Se analizaron 3 muestras de plátano y 1 de coco. A continuación, se muestran las imágenes obtenidas.

En la figura 5.14 se observa la primera muestra de nanofibras de plátano. Se puede observar que son fibras de aproximadamente 104 micras, conformadas por microfibras de un espesor de 4 micras, y éstas mismas se encuentran conformadas por fibras de un espesor aproximado de 500 nanómetros.

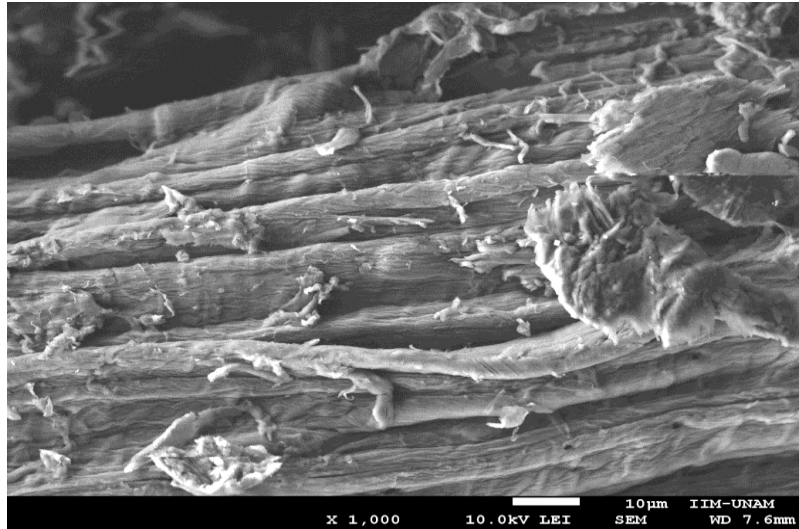


Figura 5.14 NFC plátano I

En la figura 5.15 se aprecia otra muestra de plátano. En estas imágenes no se pueden apreciar tan fácilmente las nanofibras, se considera que esto es debido al cambio de temperatura que se realizó en la obtención de las nanofibrillas a partir de los residuos; por lo que se puede deducir que es importante un adecuado control de la temperatura en la obtención.

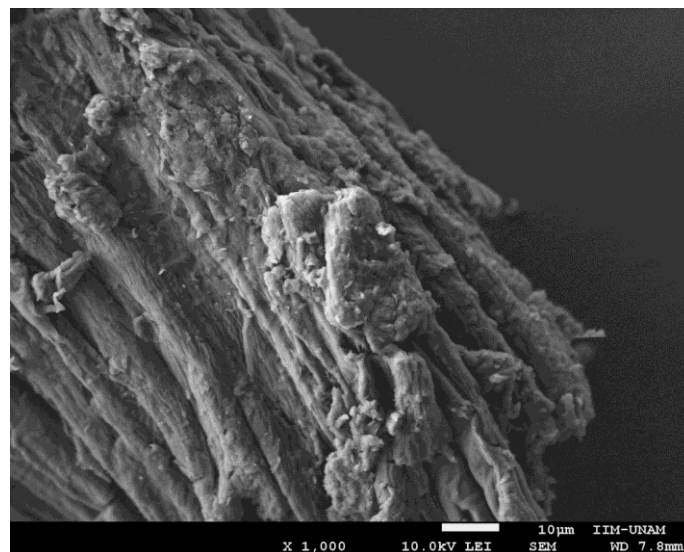


Figura 5.15 NFC Plátano II

En la figura 5.16 se aprecia otra muestra de plátano y se puede observar que tiene un comportamiento similar a la primera muestra de plátano que se expone en la figura 5.14.

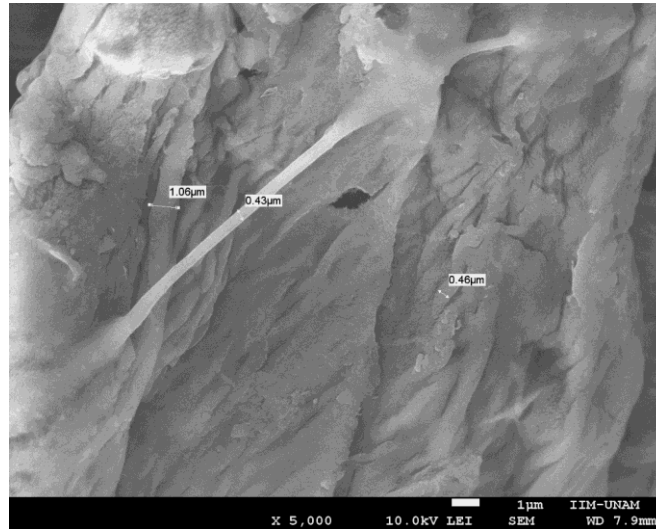


Figura 5.16 NFC Plátano III

En la figura 5.17 se observa una muestra de nanofibras de coco. Se puede observar que es una fibra porosa conformada por fibras con un espesor entre 50 y 60 nanómetros. Teniendo la fibra compuesta un espesor de 875 nm aproximadamente.

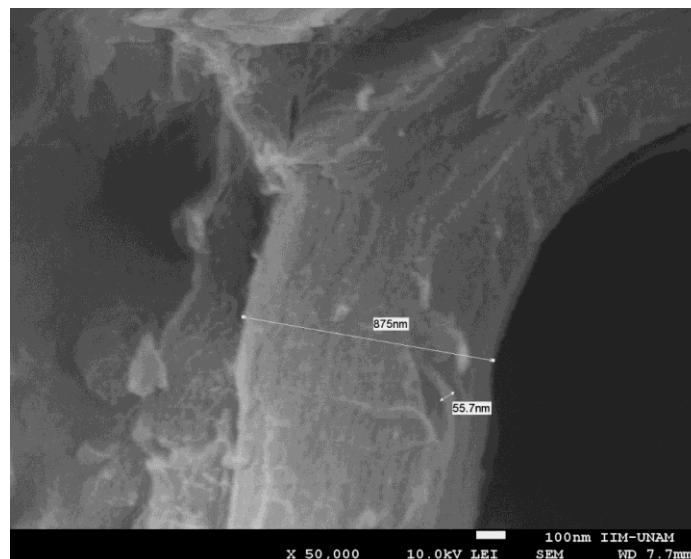


Figura 5.17 NFC Coco

5.6 Producción de fibras mediante electrospinning.

De acuerdo al procedimiento explicado en la sección anterior de metodología y con el fin de cumplir el objetivo 5 del presente trabajo, el material a electrohilar se disolvió completamente en la solución que se inyectó (solución de acetato de 1-etil-3-metilimidazolio y N, N-Dimetilformamida), tanto en electrospinning como en forcespinning. En las tablas 5.5 a la 5.9 se muestran las diferentes concentraciones que se utilizaron para obtener las fibras en ambos equipos y los resultados obtenidos.

Tabla 5.5 Soluciones de plátano en electrospinning.

Plátano		Electrospinning		Cantidad (g)	Tiempo de homogenización	Flujo	Voltaje (kV)	Distancia del colector (cm)	Resultados
		Concentración							
		EMIM-Ac	DMF						
1	NFC PL1 III	4.60 mL	6 mL	33.31	2 días	x	x	x	Espeso. Partículas muy grandes.
2	NFC PL1 I	8 mL	14 mL	0.5112	4 horas	2	20	20	Muy líquida. Debe ser más viscosa.
3	NFC PL1 II	8 mL	14 mL	0.5226	4 horas	2	20	20	Muy líquida. Debe ser más viscosa.
4	NFC PL3 II	2 g	3.5 g	0.3510	24 horas	3.5	15	20	Solución muy conductora. Se forman arcos eléctricos.
5	NFC PL4 II	1.0295 g	1.8016 g	0.1765	24 horas	4	15	20	Solución muy conductora. Se forman arcos eléctricos.

Tabla 5.6 Soluciones de plátano en forcespinning.

	Plátano	Forcespinning		Cantidad (g)	Tiempo de homogenización	Resultados
		Concentración				
		Metilimidazolio	DMF			
1	NFC PL1FRC III	4.60 mL	6 mL	33.31	2 días	Espeso. Partículas muy grandes.
2	NFC PL1FRC I	8 mL	14 mL	0.5112	4 horas	Muy líquida. Debe ser más viscosa.
3	NFC PL1FRC II	8 mL	14 mL	0.5226	4 horas	Muy líquida. Debe ser más viscosa.
4	NFC PL2FRC I	8 mL	14 mL	1.36	24 horas	No se produjeron fibras.
5	NFC PL2 II	8 mL	14 mL	1.36	24 horas	No se produjeron fibras.
6	NFC PL2FRC I	0.30 g	0.46 g	1.6127	24 horas	Solución saturada, menos concentración de material.
7	NFC PL2FRC II	2 g	3.5 g	0.3256	24 horas	Podría ser una solución aproximada. Agregar diferentes porcentajes de material.
8	NFC PL3FRC II	2 g	3.5 g	0.3510	24 horas	Se formaron grumos de material, por lo que la solución no fue expulsada por el spinneret.
9	NFC PL4FRC II	1.0295 g	1.8016 g	0.1765	24 horas	Se generaron grumos de material, pero la solución si sprayo. No se generaron fibras.
10	NFC PL5FRC II	1 g	1.75 g	0.1400	12 horas	Solución sprayo, pero no generó fibras.
11	NFC PL6FRC II	1.11 g	1.86 g	0.1600	12 horas	Solución sprayo, pero no generó fibras.

Tabla 5.7 Soluciones de coco en electrospinning y forcespinning.

Coco		Electrospinning		Cantidad (g)	Tiempo de homogenización	Flujo	Voltaje	Distancia del colector	Resultados
		Metilimidazolio	DMF						
1	NFC CC1	3.10 ml	4.5 mL	22.18	20 horas	x	x	x	Espeso. Partículas muy grandes

Debido a que no se obtuvieron resultados positivos en la obtención de fibras a partir de las soluciones realizadas, se optó por combinar las soluciones con una solución de PCL/Acetona que es usada para recubrir diferentes andamios 3D. En la tabla 5.8 se muestran las soluciones utilizadas para la obtención de las fibras óptimas.

Tabla 5.8 Soluciones de plátano y PCL/Acetona en electrospinning.

	Plátano y PCL	Concentración		Cantidad (g)	PCL/Acetona (g)	Flujo	Voltaje	Distancia del colector	Resultados	% Material en EMIM-Ac y DMF	% Material en PCL/Acetona
		EMIM-Ac (g)	DMF (g)								
1	NFC PIIPCL1	0.1742	0.305	0.0244	2.46	3.5	15	20	Se formó fibra, pero acetona se evaporó muy rápido lo que impidió se formaran más fibras.	14	1
2	NFC PIIPCL2	0.4500	0.790	0.0720	2.41	X	X	X	No se disolvieron las fibras.	14	3
3	NFC PIIPCL3	0.2857	0.4999	0.0400	4	3.5-8.5	15	15	Se obtuvo fibra, con algunas gotas de solución.	14	1
4	NFC PIIPCL4	0.2500	0.4375	0.0400	4	3.5-5.5	10 - 18	15	Se obtuvo fibra, con menor cantidad de gotas.	16	1
5	NFC PIIPCL5	0.3333	0.5775	0.0400	4	3.5-5.5	10 - 18	15 - 20	Se obtuvo fibra, con menor cantidad de gotas.	12	1
6	NFC PIIPCL6	0.2664	0.4820	0.0400	4	4 - 6	10 - 15	20	Se obtuvieron fibras, no se observaron gotas.	16	1

Tabla 5.9 Soluciones de coco y PCL/Acetona en electrospinning.

	Coco y PCL	Concentración		Cantidad (g)	PCL/Acetona (g)	Flujo	Voltaje	Distancia del colector	Resultados	% Material en EMIM-Ac y DMF	% Material en PCL/Acetona
		EMIM-Ac (g)	DMF (g)								
1	NFC CCPCL1	0.2959	0.5190	0.0400	4	3.5 - 6	10 - 17	20	Se obtuvieron fibras.	14	1
2	NFC CCPCL2	0.2716	0.4720	0.0400	4	3.5 - 6	10 - 17	20	Se obtuvieron fibras. Comportamiento más estable en flujo 5, voltaje 15.	16	1

Como se puede observar, mediante esta combinación se pudo obtener la fibra deseada. En la figura 5.18 se muestra la fibra obtenida.

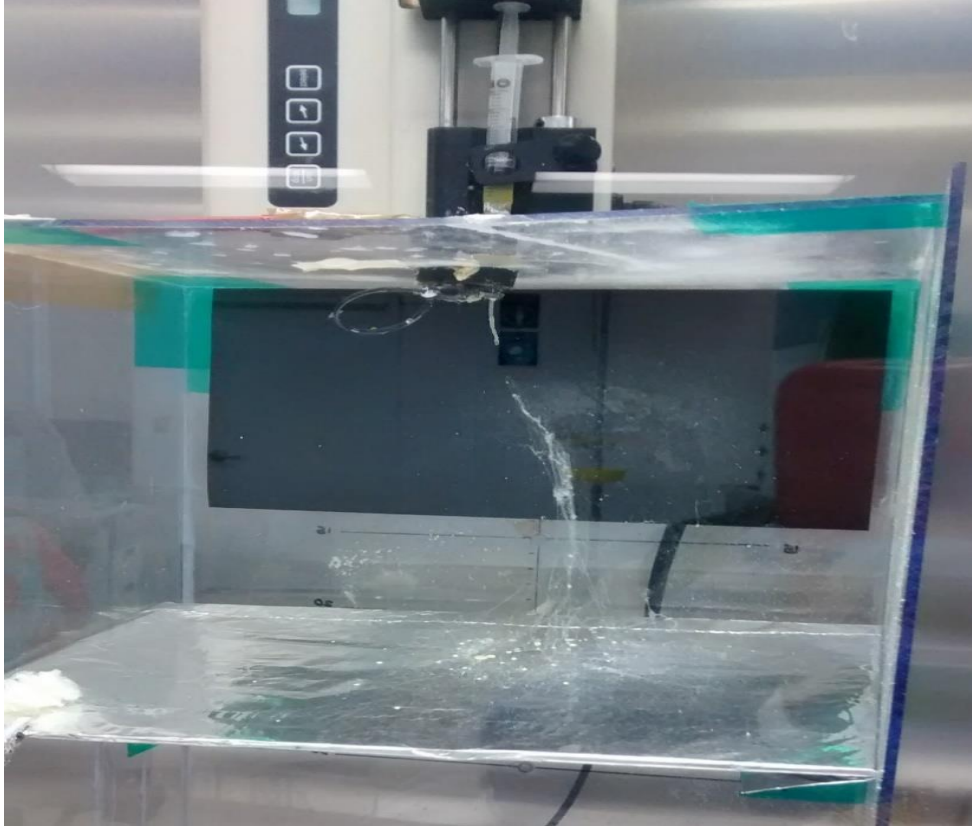


Figura 5.18 Fibra obtenida mediante electrospinning de solución plátano-PCL/Acetona.

Las fibras obtenidas se analizaron posteriormente mediante microscopia electrónica de barrido para determinar su morfología. En la figura 5.19 se muestra la imagen de las fibras de PCL/Acetona para poder comparar el comportamiento de éstas con las de mezclas con el material de nanofibras de los residuos.

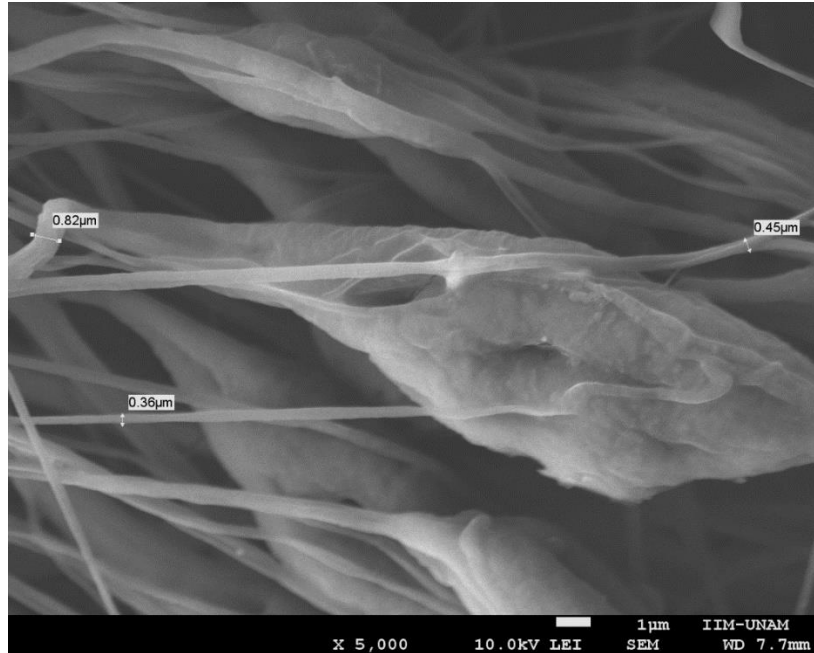


Figura 5.19 Fibras electrohiladas de PCL/Acetona.

En la figura 5.19 se puede observar que las fibras tienen un espesor de entre 0.35 y 0.85 nanómetros, con algunas secciones más gruesas que se considerarían como los llamados “beads”.

En la figura 5.20 se muestra el comportamiento de la solución de coco al 14% en 99% de la solución de PCL/Acetona. Las nanofibrillas aquí observadas tienen un espesor de entre 1.065 a 5.540 μm.

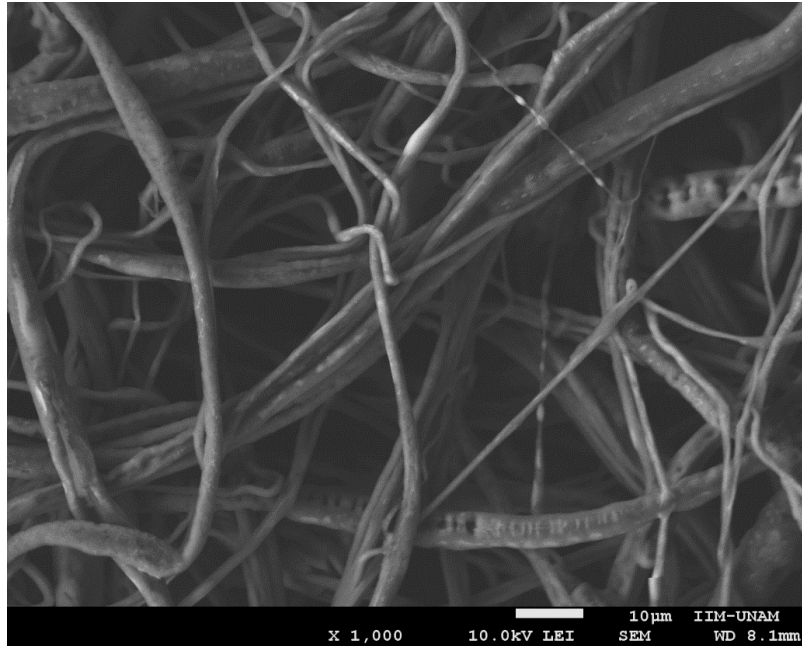


Figura 5.20 Fibras electrohiladas de Coco al 14% y PCL/Acetona al 99%.

En la figura 5.21 se pueden observar las fibras obtenidas a partir de la solución de coco al 16% disuelta en la solución de PCL/Acetona al 99%. Se observa una maraña de nanofibras de un espesor de entre 1.08 y 5.80 µm.

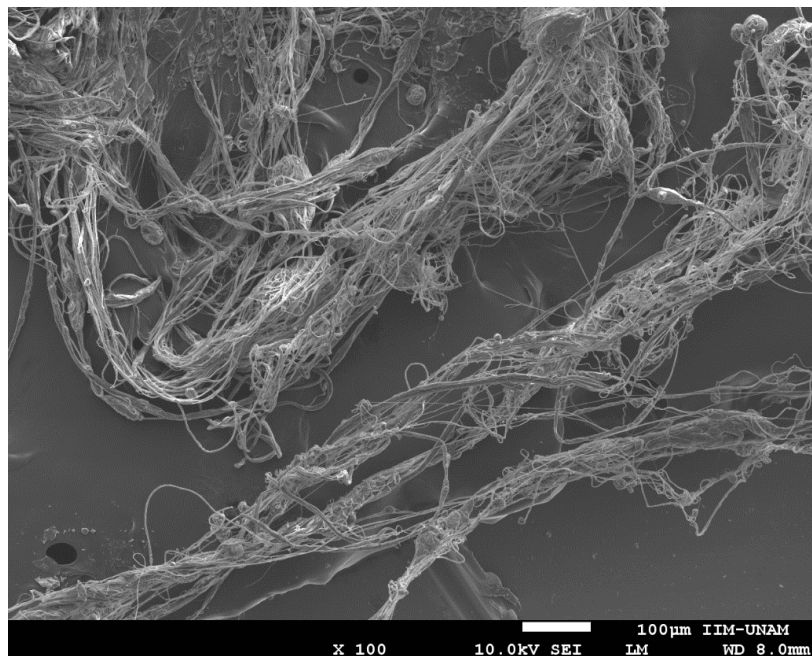


Figura 5.21 Fibras electrohiladas de coco al 16% y PCL/Acetona al 99%.

En la figura 5.22 se aprecian las fibras obtenidas a partir de la solución de plátano al 12% y solución de PCL/Acetona al 99% con un espesor de fibras de 2.24 y 5.60 μm .

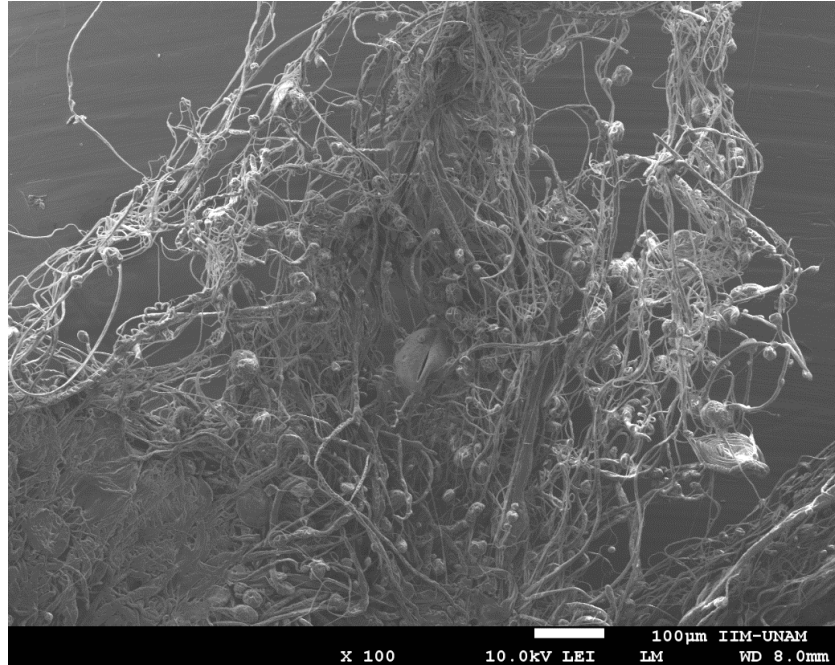


Figura 5.22 Fibras electrohiladas de plátano al 12% y PCL/Acetona al 99%.

En la figura 5.23 se aprecian las fibras obtenidas por electrospinning de la solución al 14% de plátano y 99% de PCL/Acetona. El espesor de estas fibras es de 0.50 a 2 μm .

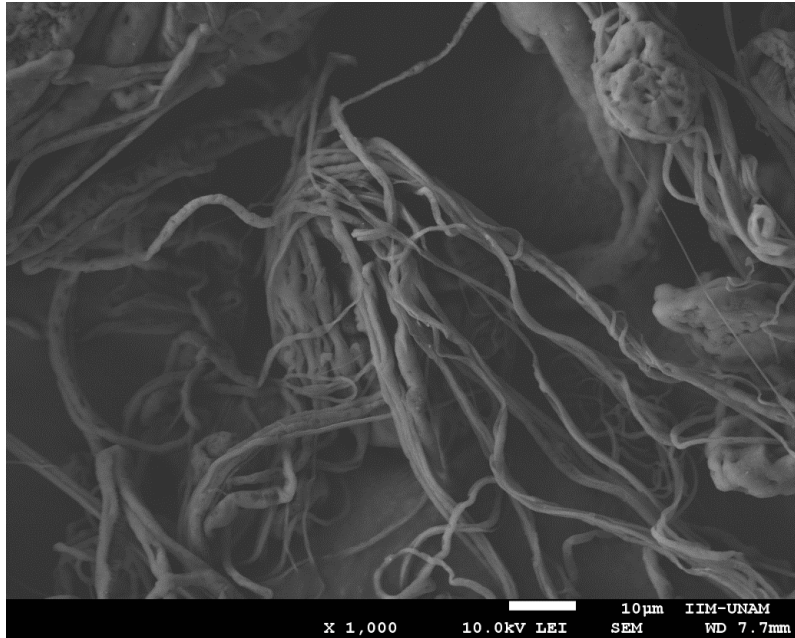


Figura 5.23 Fibras electrohiladas de plátano al 14% y PCL/Acetona al 99%.

Por último, en la figura 5.24 se pueden observar las fibras obtenidas a partir de la solución de plátano al 16% y PCL/Acetona al 99%. Estas fibras tienen un espesor aproximado de 12.14 a 2 μm.

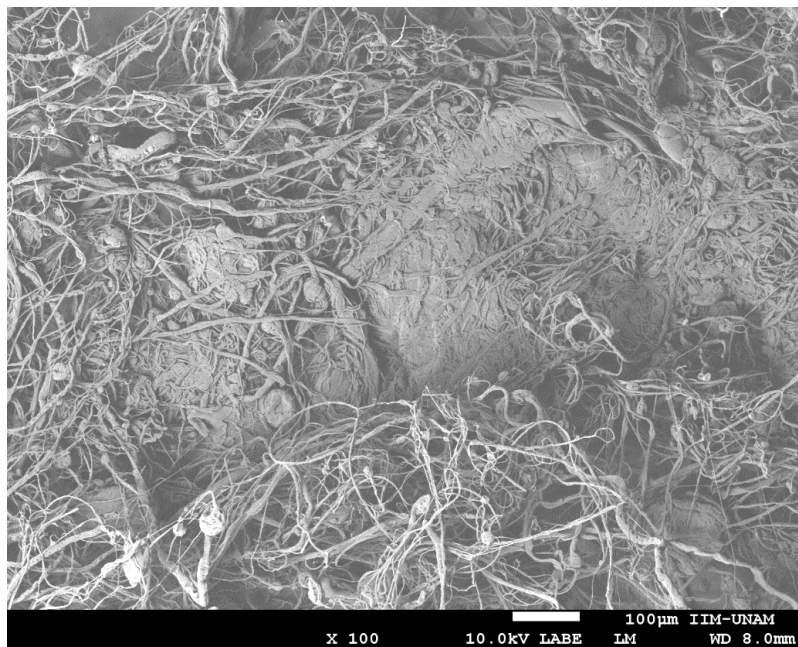


Figura 5.24 Fibras electrohiladas de plátano al 16% y PCL/Acetona al 99%.

5.7 Estudio de factibilidad técnica-económica y ambiental

5.7.1 Factibilidad técnica

Para el cumplimiento del último objetivo, para la etapa de factibilidad técnica se procedió a hilar la fibra obtenida, haciendo un huso para hilar, y de esta forma facilitar la medición de grosor y peso del hilo. A continuación, se muestran algunas de las fotografías capturadas en esta etapa.

En las figuras 5.25 y 5.26 se muestran las fibras obtenidas mediante electrospinning, hiladas con el huso para hilar.



Figura 5.25 Fibra de plátano 1%-16% hilada



Figura 5.26 Fibra de coco 1%-14% hilada

Posterior al hilado, se procedió a medir el diámetro de las fibras resultantes haciendo uso de un vernier.

En la tabla 5.10 se muestran los diámetros medidos en cada una de las fibras hiladas. En cada una de las fibras los diámetros variaron, ya que no eran uniformes. Lo anterior se debe a la formación de beads durante el proceso de electrospinning. Estos beads se forman debido a que la concentración de la solución o el peso molecular del polímero utilizado es muy baja. Por ello deben de manipularse los parámetros para evitar que estos beads se formen.

Tabla 5.10 Grosor de hilo

Prueba	Diámetro menor (mm)	Diámetro mayor (mm)
Plátano 1%-14%	0.005	0.04
Plátano 1%-16%	0.002	0.065
Coco 1%-16%	0.005	0.055
Coco 1%-14%	0.002	0.095

El hilo obtenido se pesó en una balanza analítica. En la tabla 5.11 se muestra el peso de cada una de las pruebas realizadas. Se puede observar que, tanto en el caso del plátano

como en el caso de coco, las pruebas con 1%-14% fueron las que menor peso presentaron, esto debido a la menor cantidad de beads presentes en el hilo.

Tabla 5.11 Peso del hilo

Prueba	Peso (g)
Plátano 1%-14%	0.10
Plátano 1%-16%	0.12
Coco 1%-16%	0.29
Coco 1%-14%	0.18

5.7.2 Factibilidad económica

Por cada kilo y medio de residuos de pinzote de plátano que se utilizó se obtuvo un promedio de 6.47 gramos de nanofibrillas de celulosa. En el caso de los residuos de fibra de coco, por cada kilo de residuos se obtuvo un promedio de 7.97 gramos de nanofibrillas.

En la tabla 5.12 se muestra el cálculo de las horas hombre invertidas en cada uno de los procesos realizados: obtención de nanofibrillas de plátano, obtención de nanofibrillas de coco y el proceso de electrospinning. El tiempo expresado es el promedio de horas invertidas durante una prueba de cada uno de los procesos (sin tomar en cuenta las horas que se dejaron trabajando equipos sin supervisión). Cada uno de los procesos fueron ejecutados por una sola persona cuyos conocimientos en laboratorio le permitieron realizar las operaciones.

5.12 Resultado de tiempo invertido en procesos

Proceso	Horas hombre (h)
Obtención de nanofibrillas de plátano	12.9
Obtención de nanofibrillas de coco	38
Electrospinning	7

En la figura 5.27 se muestra el porcentaje de tiempo requerido para cada uno de los procesos. Como se puede apreciar, el proceso para la obtención de nanofibrillas a partir de los residuos de fibra de coco fue el más tardado con un tiempo total de horas hombre de 38 horas, lo que equivale al 66% del tiempo total para la producción del hilo.

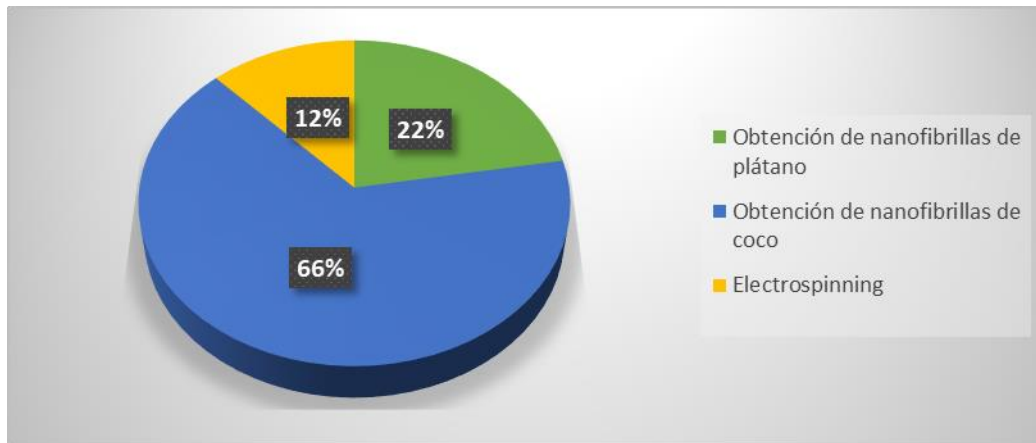


Figura 5.27 Tiempo invertido

En la tabla 5.13 se muestran los costos directos requeridos en reactivos, material, equipo y mano de obra en la obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de pinzote de plátano.

Tabla 5.13 Costos en la obtención de nanofibrillas de plátano

CONCEPTO					UNIDAD	
Obtención de nanofibrillas de celulosa de residuos de plátano						
Reactivos	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Importe	%
	Hidróxido de sodio (NaOH)	g	107.5	\$464.00	\$100.00	26.28
	Clorito de sodio (NaClO)	g	3.25	\$845.00	\$5.49	1.44
	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	mL	19.3	\$1,544.00	\$14.90	3.92
	Costo directo reactivos =					\$120.39
Material	Vasos de precipitado	pieza	2	\$193.00	\$1.06	0.28
	Embudo Buchner	pieza	1	\$538.00	\$1.47	0.39
	Kitasato	pieza	1	\$869.00	\$2.38	0.63
	Papel filtro	caja	1	\$550.00	\$1.51	0.40
	Vidrio de reloj	pieza	1	\$58.50	\$0.16	0.04
	Pipeta	pieza	2	\$60.00	\$0.33	0.09
	Capsula de porcelana	pieza	2	\$255.00	\$1.40	0.37
	Piceta	pieza	1	\$95.00	\$0.26	0.07
	Termómetro	pieza	1	\$145.00	\$0.40	0.10
	Malla de tamizado 120	pieza	1	\$1,417.50	\$3.88	1.02
Costo directo materiales =					\$12.85	3.38
Equipo	Parrilla de calentamiento con agitación magnética	pieza	1	\$9,480.00	\$5.19	1.37
	Horno	pieza	1	\$849.00	\$0.47	0.12
	Centrífuga refrigerada	pieza	1	\$315,000.00	\$86.30	22.68
	Balanza analítica	pieza	1	\$24,215.00	\$13.27	3.49
	Micromolino	pieza	1	\$50,000.00	\$27.40	7.20
	Licuada	pieza	1	\$499.00	\$0.27	0.07
Costo directo equipo =					\$132.90	34.92
Mano de obra	Ingeniero o biólogo	jornada	1	\$10,300.00	\$114.40	30.06
	Costo directo mano de obra =					\$114.40

En la figura 5.28 se hace un resumen de la tabla 5.13. En esta figura se puede observar que el costo directo de equipo es el mayor, con un 35% del costo total. Le sigue el costo directo

en reactivos con un 32%, el costo en mano de obra tiene un 30% y por último el costo directo de material con un 3%.

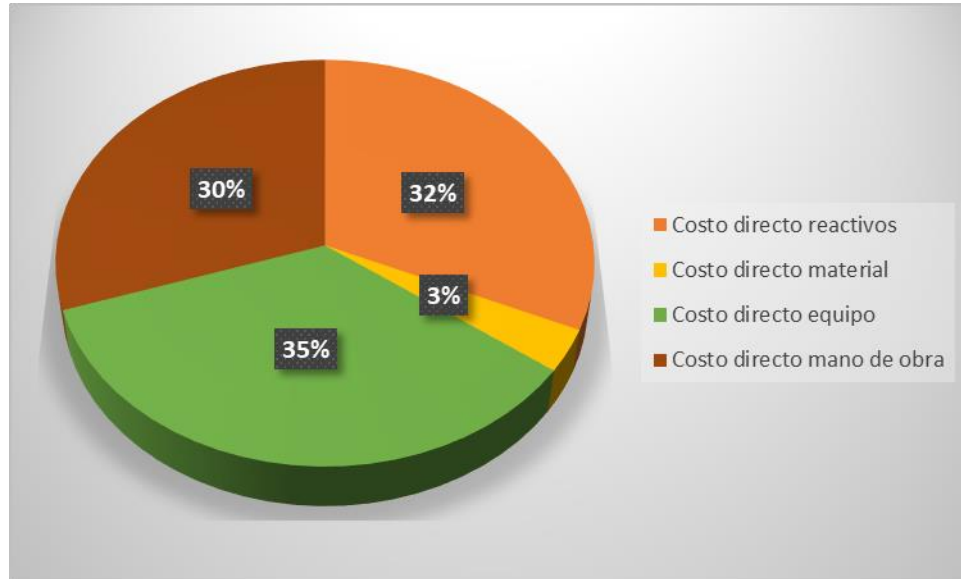


Figura 5.28 Costos directos en la obtención de nanofibrillas de plátano

En la tabla 5.14 se enumeran los costos directos requeridos en el proceso de obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de fibra de coco.

Tabla 5.14 Costos en obtención de nanofibrillas de coco

CONCEPTO					UNIDAD		
Obtención de nanofibrillas de celulosa de residuos de coco							
	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Importe	%	
Reactivos	Hidróxido de sodio (NaOH)	g	85	\$464.00	\$79.00	13.44	
	Clorito de sodio (NaClO)	g	21.8	\$845.00	\$37.00	6.29	
	Ácido acético glacial (CH ₃ COOH)	mL	100	\$1,757.00	\$175.70	29.89	
	Ácido nítrico (HNO ₃)	mL	3.2	\$668.00	\$0.85	0.14	
	Peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂)	mL	36	\$88.00	\$6.33	1.08	
	Borato de sodio (Na ₂ B ₄ O ₇)	g	6	\$547.00	\$6.60	1.12	
	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	mL	30	\$1,544.00	\$23.16	3.94	
	Costo directo reactivos =					\$328.64	55.91
	Material	Vasos de precipitado	pieza	1	\$193.00	\$0.53	0.09
Matraz Erlenmeyer		pieza	1	\$146.00	\$0.40	0.07	
Matraz Kitasato		pieza	1	\$869.00	\$2.38	0.41	
Embudo Buchner		pieza	1	\$538.00	\$1.47	0.25	
Papel filtro		caja	1	\$550.00	\$1.51	0.26	
Vidrio de reloj		pieza	1	\$58.50	\$0.16	0.03	
Capsula de porcelana		pieza	1	\$255.00	\$0.70	0.12	
Pipeta		pieza	1	\$60.00	\$0.16	0.03	
Piceta		pieza	1	\$95.00	\$0.26	0.04	
Termómetro		pieza	1	\$145.00	\$0.40	0.07	
Malla de tamizado 120		pieza	1	\$1,417.50	\$3.88	0.66	
Costo directo material =					\$11.85	2.02	
Equipo	Parrilla de calentamiento con agitación magnética	pieza	1	\$9,480.00	\$5.19	0.88	
	Horno	pieza	1	\$849.00	\$0.47	0.08	
	Balanza analítica	pieza	1	\$24,215.00	\$13.27	2.26	
	Licuadora	pieza	1	\$499.00	\$0.27	0.05	
	Micromolino	pieza	1	\$50,000.00	\$27.40	4.66	
	Centrífuga refrigerada	pieza	1	\$315,000.00	\$86.30	14.68	
Costo directo equipo =					\$132.90	22.61	
Mano de obra	Ingeniero o biólogo	jornada	1	\$10,300.00	\$114.40	19.46	
	Costo directo mano de obra =					\$114.40	19.46

En la figura 5.29 se muestra el comparativo en porcentaje de los costos directos de reactivos, material, equipo y mano de obra del procedimiento de obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de fibra de coco. En este procedimiento, los costos directos de reactivos son los que mayor resalte tienen, con un 56%. El costo de equipo tiene el 23%, seguido del costo directo de mano de obra con el 19% y por último el costo directo de material con el 2%.

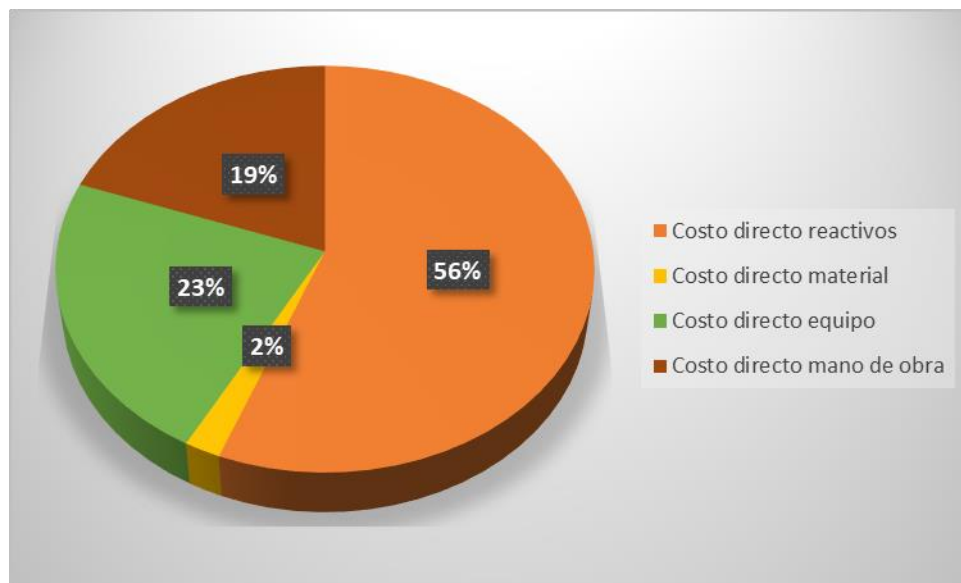


Figura 5.29 Costos directos en obtención de nanofibrillas de coco

En la tabla 5.15 se enumeran los costos directos requeridos para el proceso de electrospinning.

5.15 Gastos en electrospinning

CONCEPTO					UNIDAD	
Electrospinning						
	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Importe	%
Reactivos	N-N, Dimetilformamida (DMF)	mL	60	\$2,484.00	\$75.00	1.38
	Acetato de 1-etil-3-metilimidazolio (C ₈ H ₁₄ N ₂ O ₂)	g	80	\$6,477.00	\$5,182.00	95.53
	Costo directo reactivos =				\$5,257.00	96.91
	Material					
Material	Vasos de precipitado	pieza	1	\$193.00	\$0.53	0.01
	Capsula de porcelana	pieza	1	\$255.00	\$0.70	0.01
	Pipeta	pieza	1	\$60.00	\$0.16	0.00
	Frascos con tapa	pieza	1	\$12.00	\$0.03	0.00
	Costo directo material =				\$1.42	0.03
Equipo	Parrilla de calentamiento con agitación magnética	pieza	1	\$9,480.00	\$5.19	0.10
	Horno de secado	pieza	1	\$21,200.00	\$5.81	0.11
	Balanza analítica	pieza	1	\$24,215.00	\$13.27	0.24
	Electrospinning	pieza	1	\$50,000.00	\$27.40	0.51
	Costo directo equipo =				\$51.67	0.95
Mano de obra	Ingeniero	jornada	1	\$10,300.00	\$114.40	2.11
	Costo directo mano de obra =				\$114.40	2.11

En la figura 5.30 se muestra el comparativo entre los costos directos del proceso de electrospinning. Como se puede observar, el costo de los reactivos es superior a los demás costos con el 97% del total.

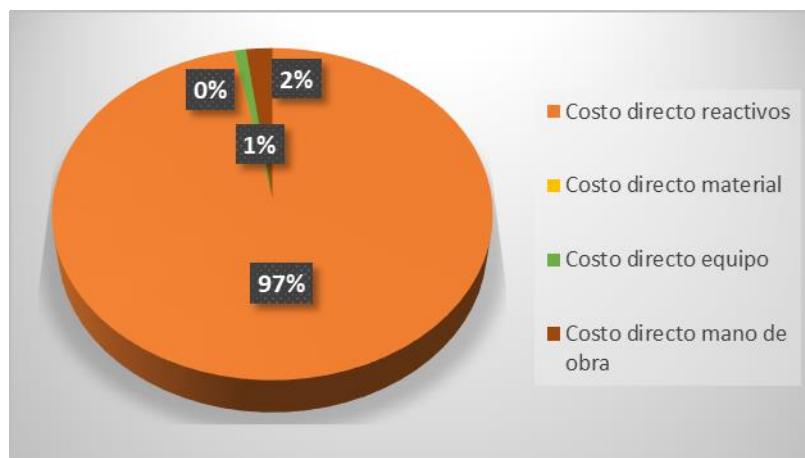


Figura 5.30 Costos directos en electrospinning

En la figura 5.31 se hace una comparativa entre los costos directos de cada uno de los procesos realizados. Como se puede observar, quién tiene mayor costo es el proceso de electrospinning, como un 85% del total requerido; esto principalmente por el costo directo de reactivos. Le sigue la obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de coco, con un 9% del total; y por último la obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de pinzote de plátano con un 6%.

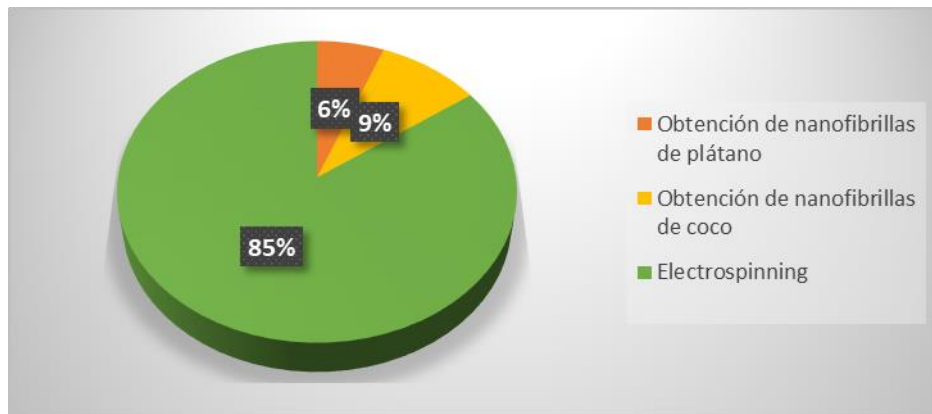


Figura 5.31 Costos directos de procesos

Con esto se puede deducir que es más factible económicamente la obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de pinzote de plátano, a comparación de la obtención a partir de residuos de fibra de coco. Y en cuanto al proceso de electrospinning, debido a los altos costos de los reactivos, se recomienda seguir probando otras metodologías, como la obtención de la viscosa o rayón, para la obtención del hilo.

5.7.3 Factibilidad ambiental

En la tabla 5.16 se muestra la cantidad de residuos generados durante cada uno de los procedimientos realizados y la medida de mitigación que se aplicó con cada uno de ellos.

Tabla 5.16 Residuos generados

Residuo	Cantidad	Medida de mitigación aplicada
Obtención de nanofibrillas de plátano		
Licor negro (residuos de lignina y hemicelulosa)	30 mL	Neutralizado. Entregado a transferencia temporal del LIA.
H ₂ SO ₄	20 mL	Neutralizado hasta pH neutro. Entregado a transferencia temporal del LIA.
Obtención de nanofibrillas de coco		
NaOH	40 mL	Neutralizado. Diluido con abundante agua y neutralizado con ácido clorhídrico. Entregado a transferencia temporal del LIA.
H ₂ SO ₄	38 mL	Neutralizado hasta pH neutro. Entregado a transferencia temporal del LIA.

Los residuos orgánicos generados de cáscaras de pinzote o coco se procesaron en composta. En la figura 5.32 se muestra el porcentaje de residuos que genero cada uno de los procesos. El proceso de obtención de nanofibrillas de plátano genero el 39% de los residuos, mientras que el proceso de obtención de nanofibrillas a partir de residuos de fibra de coco generó el 61% de los residuos totales del presente trabajo.

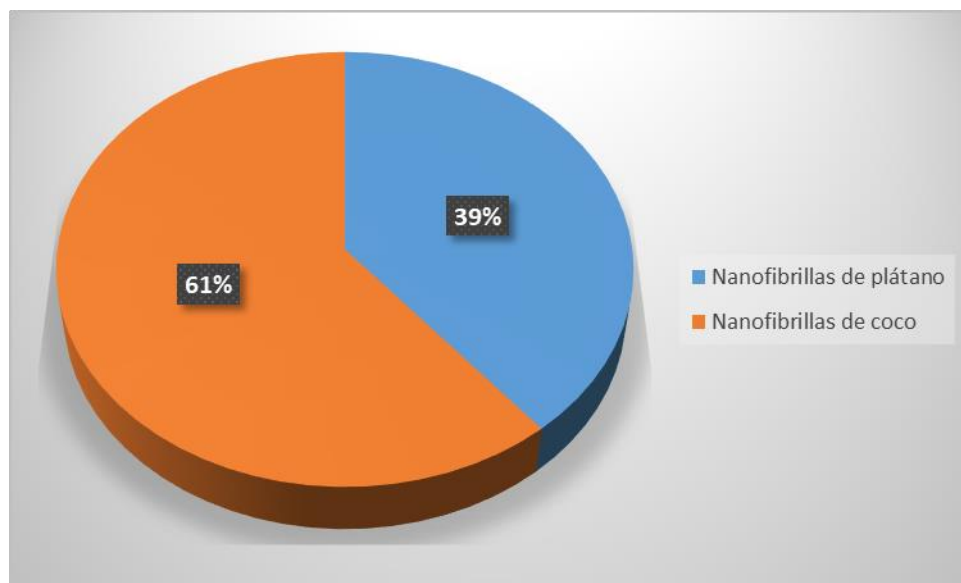


Figura 5.32 Residuos de los procesos

En la tabla 5.17 se muestra la lista de los equipos utilizados y la cantidad de tiempo y energía que se usó para cada uno de los procedimientos.

Tabla 5.17 Energía utilizada

Equipo	Consumo en Watts por equipo	Número de equipos	Consumo Horas/día	Watts/día	kW/día
Obtención de nanofibrillas de plátano					
Parrilla con agitación	160	1	5	800	0.8
Horno	100	1	12	1200	1.2
Micromolino	80	1	1	80	0.08
Centrífuga refrigerada	700	1	2	1400	1.4
Obtención de nanofibrillas de coco					
Parrilla con agitación	160	1	8	1280	1.28
Horno	100	1	24	2400	2.4
Micromolino	80	1	4	320	0.32
Centrífuga refrigerada	700	1	1	700	0.7
Electrospinning					
Parrilla con agitación	160	1	24	3840	3.84
Horno	200	1	12	2400	2.4
Electrospinning	1500	1	2.5	3750	3.75

En la figura 5.33 se hace una comparación de los kW requeridos para cada uno de los procedimientos. En la figura 5.32 se muestra la comparativa en uso de energía de cada uno de los procesos. Como se puede observar, el proceso de electrospinning requiere de 55% del total de la energía requerida para el trabajo. Seguido de la obtención de nanofibrillas de coco con un 26% y por último las nanofibrillas de plátano con el 19%.

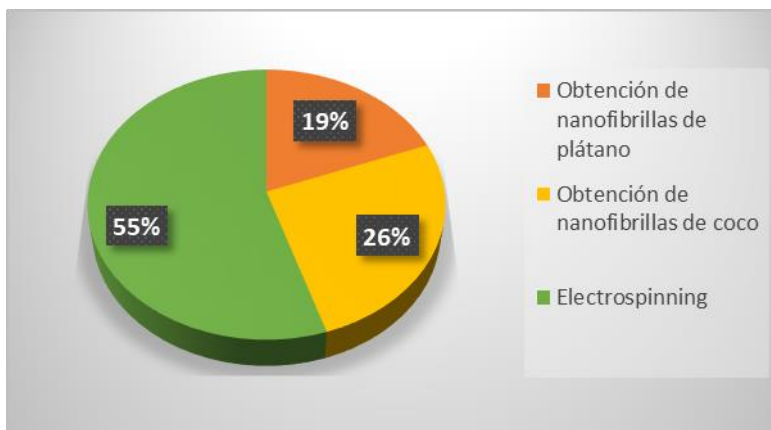


Figura 5.33 Energía requerida para los procesos

En la tabla 5.18 se muestra un resumen de todos los factores económicos y ambientales de cada uno de los procesos realizados para posteriormente en la tabla 5.19 jerarquizarlos con un valor máximo de 10 para de esta forma poder determinar cuál de los procesos es el menos factible en términos económicos y ambientales.

Tabla 5.18 Resumen de factores económicos y ambientales

Proceso	Horas hombre	Reactivos	Material	Equipo	Mano de obra	Residuos	Energía
Obtención de nanofibrillas de plátano	12.9	120.39	12.85	132.9	114.4	50	3.48
Obtención de nanofibrillas de coco	38	328.64	11.85	132.9	114.4	78	4.7
Electrospinning	7	5257	1.42	51.67	114.4	0	9.9

Tabla 5.19 Resumen de factores jerarquizado

Proceso	Horas hombre	Reactivos	Material	Equipo	Mano de obra	Residuos	Energía	Problema
Obtención de nanofibrillas de plátano	3.4	0.2	10.0	10.0	10.0	6.4	3.5	6.2
Obtención de nanofibrillas de coco	10.0	0.6	9.2	10.0	10.0	10.0	4.7	7.8
Electrospinning	1.8	10.0	1.1	3.9	10.0	0.0	10.0	5.3

En la figura 5.34 se muestra que el proceso de obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de coco es el proceso menos factible ya que es el proceso que utiliza una mayor cantidad de reactivos y de horas hombre para su elaboración, por ende, genera mayor cantidad de residuos y utiliza una mayor cantidad de energía. Con esto se puede deducir, que entre la obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de residuos de pinzote de plátano y de residuos de fibra de coco, es más factible utilizar los residuos del plátano; además de que existe una mayor cantidad de generación de estos residuos en la central de abasto de la Ciudad de México.

En cuanto al proceso de electrospinning, no genera residuos y requiere de una cantidad moderada de horas hombre, pero requiere de reactivos con un precio alto; por lo que, por este motivo principalmente, se considera que no es el método más apropiado para la fabricación de hilo a partir de estos materiales.

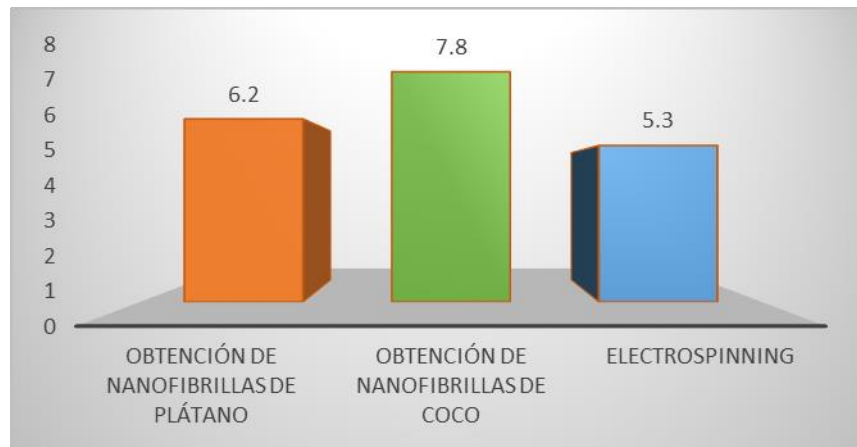


Figura 5.34 Jerarquización de los procesos

6. CONCLUSIONES

La generación de residuos sólidos orgánicos de pinzote de plátano y de fibra de coco fue de 1, 720,415.92 y 62,591.51 toneladas respectivamente durante el ciclo productivo del año 2016 en la República Mexicana. No existen estudios previos que muestren datos acerca de la generación de estos residuos u otros residuos sólidos orgánicos agrícolas en la República Mexicana.

En la central de abasto de la Ciudad de México la generación de residuos sólidos orgánicos de pinzote de plátano fue mayor a los residuos generados del cultivo de coco; se generan hasta 6 toneladas diarias y de 250 a 300 kg respectivamente. Es la primera vez que se publican datos acerca de la generación de residuos de estos materiales en específico, y de su mal manejo en la central de abasto de la Ciudad de México.

Ambos residuos tienen un amplio aprovechamiento, pero tiene mejores propiedades la fibra de coco debido a que es más resistente a la biodegradación y posee una durabilidad y tensión alta, comparada con otras fibras naturales. El aprovechamiento que se le dio en este estudio a estos residuos a la fecha nadie se lo ha dado.

El procedimiento de obtención de celulosa a partir de los residuos de fibra de coco es un proceso largo que requiere un adecuado control en las variables de temperatura y tiempo. La obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de plátano es un proceso más rápido y sencillo. En ambos procedimientos se obtuvo un rendimiento similar (17.75% en el caso del plátano, 17.34% en el coco), pero se considera que la obtención de las nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de pinzote de plátano es un proceso más factible y efectivo.

El hilo se obtuvo a partir de la técnica de electrospinning, utilizando una mezcla de dos soluciones. Se concluyó que la solución con mejor calidad fue la de 16% en peso, tanto en plátano como en coco.

En el estudio de factibilidad se concluyó que los residuos de pinzote de plátano y coco pueden efectivamente ser utilizados para la obtención de nanofibrillas de celulosa y de esta manera contribuir a disminuir el impacto ambiental, ya que se le estaría dando un reuso alternativo a casi 1,783,006 toneladas de residuos generados en 1 año. Sin embargo, se debe destacar que el procedimiento de obtención de nanofibrillas de celulosa a partir de los residuos de pinzote de plátano presenta una mayor factibilidad debido a que se utiliza menor cantidad de reactivos químicos, horas hombre y cantidad de energía utilizada; y por lo tanto genera menor cantidad de residuos con respecto a la de coco. En cuanto al proceso de electrospinning como método para la fabricación del hilo, aunque es un método innovador y prometedor, no se considera factible para los fines de esta investigación; debido a su alto costo y requerimiento de energía y material disponible muy alto.

7. RECOMENDACIONES

La recomendación para trabajo a futuro es realizar la comparación entre los procedimientos químicos y mecánicos para la obtención de las nanofibrillas de celulosa a partir de ambos residuos; y de esta forma determinar cuál es la mejor metodología a seguir.

Posterior a esta comparación, en la fabricación del hilo, se propone seguir haciendo pruebas de electrospinning y realizar un proceso posterior a las fibras obtenidas para que se obtenga un hilo más uniforme. Y a su vez, seguir investigando procesos para la fabricación del hilo que puedan ser más efectivos; como, por ejemplo, el proceso de fabricación de la viscosa.

8. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

Programa de capacitación para la incorporación de materiales avanzados en la industria de Nuevo León; impartido por el Tecnológico de Monterrey (Campus Monterrey) y por el CIMAV (Centro de Investigación de Materiales Avanzados).

El programa constó de 30 horas de capacitación:

1 módulo: “Nanotecnología para la industria de Nuevo León – serie 1” Viernes 26 de junio de 2015.

2 módulo: “Nanotecnología para la industria de Nuevo León – serie 2” Viernes 3 de julio de 2015.

3 módulo: “Síntesis de nanomateriales por top-down y bottom-up” Viernes 10 de julio de 2015.

4 módulo: “Oportunidades competitivas mediante la aplicación de nanomateriales” Viernes 17 de julio de 2015.

5 módulo: “Recubrimientos y materiales nano-estructurados, aplicaciones industriales y mercados de oportunidad” Viernes 24 de julio de 2015.

Seminario: “Microscopía de fuerza atómica. Una herramienta en la nanobiología” impartido por el Dr. Luis Felipe Jiménez García de la Facultad de Ciencias de la UNAM. 30 de septiembre de 2015.

Curso teórico-práctico de microscopía avanzada; impartido en el Instituto de Biología de la UNAM, con una duración de 20 horas. Del 14 al 16 de marzo de 2016.

Curso de capacitación “Operación de la centrífuga refrigerada” del Laboratorio de Ingeniería Ambiental. 11 de mayo de 2016.

Curso básico de técnicas de análisis disponibles en el laboratorio universitario de microscopía electrónica. 26, 27 y 28 de octubre de 2016.

Estancia de Investigación en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. Del 7 al 25 de noviembre de 2016.

Actualmente se encuentra en revisión un artículo para la revista “Journal of Scientific and Engineering Research” con el título de: Synthesis of cellulose nanofibrils from banana residues for the production of textile fibers.

9. REFERENCIAS

- Abitbol, T. Rivkin, A. Cao, Y. Nevo, Y. Abraham, E. Ben-Shalom, T. Lapidot, S. Shoseyov, O. (2016). “Nanocelulosa, una pequeña fibra con grandes aplicaciones”. *Current Opinion in Biotechnology*, Vol. 39, pp. 76-88.h
- Aguilar, S. Ramírez, J. Malagón, O. (2007) “Extracción de fibras no leñosas: Cabuya (*Furcraea andina Trel.*) y Banano (*Musa paradisiaca L.*) para estandarizar un proceso tecnológico destinado a la elaboración de pulpa y papel” en *Revista Iberoamericana de Polímeros*, Vol. 8, No. 2, pp. 89 – 98.
- Ahn, Y. Hyun-Lee, S. Joo-Kim, H. Yang, Y. Hong, J. Kim, Y. Kim, H. (2012). “Electrospinning de biomasa lignocelulósica usando líquidos iónicos”. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 88, pp. 395-398.
- Álvarez-Castillo, A. Gracia-Hernández, E. Domínguez-Domínguez. M. Granandos-Baeza, J. Aguirre-Cruz, A. Carmona-Gracia, R. Morales-Cepeda, A. Herrera-Franco, P. Licea-Claverie, A. Mendoza-Martínez, A. (2012). “Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos”. *Revista Iberoamericana de polímeros*. Vol. 13, No. 4, pp. 140-150.
- Beck-Candanedo, S. (2005). “Efecto de las condiciones de reacción sobre las propiedades y el comportamiento de las suspensiones de nanocristales de celulosa de la madera”. Department of Chemistry, Pulp and Paper Research Centre, McGill University, Montréal, Québec.
- Bhattacharya, D. Germinario, L. Winter, W. (2008) “Aislamiento, preparación y caracterización de microfibras de celulosa obtenidas del bagazo” en: *Carbohydrate Polymers*, pp. 371-377.
- Bolio-López, G. Valadez-González, A. Veleva, L. Andreeva, A. (2011) “Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización” en *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10, No. 2, pp. 291 – 299.

- Bornare, P. Deshmukh, D. Talele, D. (2014). “Tendencias recientes en los sub-productos del plátano y las estrategias de comercialización: una revision crítica”. PratiBha: International Journal of Science, Vol. 3, No. 1, pp. 45-48.
- Canché, G. Santos-Hernández, J. Andrade-Canto, S. (2005) “Obtención de celulosa a partir de los desechos agrícolas del banano” Información tecnológica, Vol. 16. No. 1, pp. 83 – 88.
- Carchi, M. (2014) “Aprovechamiento de los residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano para obtener nanocelulosa” Tesis de grado en Ingeniería química, Cuenca, Ecuador. Facultad de ciencias químicas. Universidad de Cuenca.
- Cazaurang, M. Peraza, S. Cruz, R. (1990). “Disolución de pulpas de grado de fibra de henequén”. Cellulose Chemistry and Technology. pp. 629-638.
- Cifuentes, F. Moreno, Y. Vente, M. Montaña, J. (2011) “Proyecto empresarial para la producción y comercialización del coco y sus derivados”. Centro náutico pesquero Buenaventura (Valle).
- Cordeiro, N. Belgacem, M. Torres, I. Moura, J. (2004) “Composición química y despulpado de pseudotallo de banana” Industrial Crops and Products. Vol. 19, No. 2, pp. 147-154.
- Da Costa Lopez, A. Joao, K. Rubik, D. Bogel-Lukasik, E. Duarte, L. Andreaus, J. Bogel-Lukasik, R. (2013). “Pre-tratamiento de la biomasa lignocelulósica con líquidos iónicos: fraccionamiento de trigo”. Bioresource technology, Vol. 142, pp. 198-208.
- Deepa, B. Abraham, E. Cherian, B. Bismarck, A. Blaker, J. Pothan, L. Leao, A. Ferreira de Souza, S. Kottaisamy, M. (2011) “Estructura, morfología y características de las nanofibras de banano obtenidas por explosión de vapor” Bioresource Technology, Vol. 102, pp. 1988-1997.
- Duque, L. Rodriguez, L. López, M. (2013). “Electrospinning: la era de las nanofibras”. Revista Iberoamericana de Polímeros, Vol. 14, No. 1, pp. 10-27.
- Espitia, H. (2010). “Aislamiento de nanofibras de celulosa a partir de residuos agroindustriales de fique y caña de azúcar, con potencial aplicación en

reforzamiento de polímeros termoplásticos”. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.

- FECYT (2009) “Nanociencia y nanotecnología. Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro” Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. Pp. 20 – 44.
- Ferrer, A. (2013). “Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma. Obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar”. Universidad de Córdoba
- Figueiredo, M. Freitas Rosa, M. Lie Uhaya, C. Souza Filho, M. Cameiro, A. Luciano, L. (2012). “Evaluación del ciclo de vida de nanowhiskers de celulosa”. Journal of cleaner production, Vol. 35, pp. 130-139.
- Guarnizo, A. Nel Martínez, P. (2011) “Estudio de la hidrólisis ácida del raquis de banano” en Rev. Invest. Univ. Quindío. Vol. 22, pp. 83 – 91.
- Gutiérrez-Rojas, I. Moreno-Sarmiento, N. Montoya, Dolly. (2015) “Mecanismos y regulación de la hidrólisis enzimática de celulosa en hongos filamentosos: casos clásicos y nuevos modelos” Revista Iberoamericana de Micología, Vol. 32, No. 1, pp. 1-12.
- Hernandez, C. Rosa, S. (2016). “Extracción de nanowhiskers de celulosa: fuente de fibras naturales, metodología y aplicación”. Polymer Science: research advances, practical applications and educational aspects, Vol. 1, pp. 232-242.
- Hon, D. Shiraishi, N. (2001) “Química de madera y celulosa” Second Ed. New York, Marcel Dekker Inc.
- Hormaiztegui, M. Buffa, J. Aranguren, M. Mucci, V. (2013) “Nanocristales de celulosa: caracterización y modificación química” División ecomateriales. Instituto de investigaciones en ciencia y tecnología de materiales (INTEMA-CONICET) Facultad de ingeniería. Universidad nacional de mar del plata. Argentina. [En línea] <http://intema.gob.ar/biocomp/Resumenes%20I%20Workshop%20BIOCOMP/Hormaiztegui%20M.pdf> [ultimo acceso 20 de octubre de 2015].

- Ibrahim, M. El-Zawawy, W. Nassar, M. (2010). “Síntesis y caracterización de películas de partículas de alcohol polivinílico/celulosa nanosférica”. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 79, pp. 694-699.
- Instituto de Química, UNAM, [En línea]. Available: <http://www.iquimica.unam.mx/index.php/labdeserviciosiq-alias/difraccion-de-rayos-x>. [Último acceso: Octubre 2015].
- Kadirvelu, K. Kavipriya, M. Karthika, C. Radhika, M. Vennilamani, N. Pattabhi, S. (2003) “Uso de diversos residuos agrícolas para la preparación de carbón activado y aplicación para la eliminación de colorantes e iones metálicos de soluciones acuosas”, *Bioresour Technology*. Vol. 87, pp. 129-132.
- Kalia, S. Kaith, B. Kaur, I. (2011) “Fibras de celulosa: compuestos biológicos y nanopolímeros” Springer.
- Khan, M. Sarkar, M. Al Imam, F. Malinen, R. (2013) “Estudio de morfología y pulpa de fibra de pseudotallo de plátano” en *International Journal of Fiber and Textile Research*; Vol. 3, No. 1, pp. 31 – 35.
- Kumar, M. Kumar, D. (2011) “Estudio comparative de la pulpa de tallo de banano” en *International Journal of Fiber and Textile Research*. Vol. 1, No. 1, pp.1 – 5.
- López, A. (2004). “Influencia del proceso de reciclado sobre las propiedades de los materiales compuestos obtenidos por inyección de poliestireno reforzado con fibras lignocelulósicas”. Tesis de doctorado. Universidad de Girona, España.
- Meneses, M. Agatón, L. Mejía, L. Guerrero, L. Botero, J. (2010) “Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el departamento de caldas”. *Revista educación en ingeniería*. No. 9, pp 128-139.
- Mittal, A. Chisti, Y. Chand, U. (2013). “Síntesis de nanopartículas metálicas utilizando extractos de plantas”. *Biotechnology advances*, Vol. 31, No. 2, pp. 346-356.
- Mohapatra, D. Mishra, S. Sutar, N. (2010) “Plátano y su subproducción: una visión general” en *Journal of Scientific& Industrial Research*. Vol.69, pp. 323 – 329.

- Molina, J. Paz, Y. Colina, M. Calderón, D. (2012) “Caracterización de celulosa obtenida del pseudotallo de plátano con fines industriales” en Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol. 12, No. 6, pp. 332 – 341.
- Morán, J. (2008) “Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra sisal - caracterización,” Asociación Argentina de Materiales. Universidad nacional de Mar del Plata. Mar del Plata, Argentina.
- Mukhopadhyay, S. Fangueiro, R. Arpac, Y. Senturk, U. (2008) “Fibras de plátano: variabilidad y comportamiento de fractura” en Journal of Engineered Fibers and Fabrics. Vol. 3, No. 2, pp. 39 – 45.
- Nanocomposites poliméricos desarrollados a partir de residuos generados por la agroindustria. [En línea] <http://aiquruguay.org/congreso/download/TL10.pdf> [Último acceso 1 de noviembre de 2015].
- Novoa, M. (2005). “Elaboración y evaluación de tableros aglomerados a base de fibra de coco y cemento” Tesis de maestría. Universidad de Colima.
- Ohkawa, K. (2015). “Nanofibras de celulosa y sus derivados, fabricados usando electrospinning”. Molecules, Vol. 20, pp. 9139-9154.
- Pillai, K. (2011) “Nanocompuestos de celulosa bioinspirados”. Tesis de doctorado. Blacksburg, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Pothan, L. Thomas, S. Neelakantan, N. (1997) “Compuestos cortos de poliéster reforzado con fibra de plátano: características mecánicas, de falla y envejecimiento” Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 16, No. 8, pp. 744-765.
- Quispe, A. (2015) “El valor potencial de los residuos sólidos orgánicos, rurales y urbanos para la sostenibilidad de la agricultura.” Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Vol. 6, No. 1.
- Ramsden, J. (2009). “Nanotecnología aplicada. La conversión de resultados de investigación a productos”. William Andrew. pp. 27 – 36.
- Raven, P. Johnson, G. Mason, K. Losos, J. Singer, S. (2014). “Biología”. McGraw-Hill, 10° edición. pp. 147-167.

- Reed, A. Williams, P. (2004) “Proceso térmico de residuos de fibra natural de biomasa mediante pirolisis”, *International journal of energy research*. Vol. 28, No. 2, pp. 131-145.
- Robles, M. Rodríguez-Félix, F. Márquez-Ríos, E. Barrera, A. Aguilar, J. Del Toro, C. (2014). “Aplicaciones biomédicas, textiles y alimentarias de nanoestructuras elaboradas por electrohilado”. *Revista de ciencias biológicas y de la salud*, Vol. 16, No. 2, pp. 44-52.
- Rosa, M. Medeiros, E. Malmonge, J. Gregorski, K. Wood, D. Mattoso, L. Glenn, G. Orts, W. Imam, S. (2010). “Nanowhiskers de celulosa de fibras de cascara de coco: efecto de las condiciones de preparación en su comportamiento térmico y morfológico”. *Carbohydrate Polymers*, Vol. 81, pp. 83-92.
- Ruvalcaba Sil, «proyecto ANDREAH,» Instituto de Física, UNAM, [En línea]. Available: http://www.fisica.unam.mx/andreah/tecnicas_equipos/ftir.html. [Último acceso: Octubre 2015].
- Santos, L. (2014). “Aislamiento de hongos filamentosos con propiedades de producción de la enzima celulasa” Tesis de grado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila.
- Satyanarayana, E. (2009). “Materiales biodegradables a base de fibra lignocelulósica – Una visión general”. *Progress in polymer science*, Vol. 34, pp. 989-1021.
- Saval, S. (2012) “Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro.” Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Singh-nee, P. Pandey, A. (2009) “Biotecnología para la utilización de residuos agroindustriales”. Springer. Pp. 18-23.
- Song, K. Wu, Q. Zhang, Z. Ren, S. Lei, T. Dooley, K. Liu, D. Janes, M. (2015). “Fabricando nanofibras electrohiladas con capacidad antimicrobiana: una ruta fácil para reciclar la biomasa”. *Fuel*, Vol. 150, pp. 123-130.
- Tan, X. Li, X. Chen, L. Xie F. (2016). “Solubilidad del almidón y celulosa microcristalina en líquido iónico de acetato de 1-etil-3-metilimidazolio y propiedades reológicas de la solución”. *Royal Society of Chemistry*. pp. 1-11.

- Tibolla, H. Pelissari, F. Menegalli, F. (2014) “Nanofibras de celulosa producidas a partir de cáscaras de plátano por tratamiento químico y enzimáticos” LWT - Food Science and Technology, pp. 1311-1318.
- Ureña, E. (2011). “Propiedades y aplicaciones de nanocristales de celulosa en nanocompuestos renovables”. Tesis de doctorado. Clemson, South Carolina. Clemson University.
- Williams, L. Adams, W. (2007). “Nanotecnología desmitificada”. New York: McGraw Hill. pp. 255.