



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de  
Banano para obtener Nanocelulosa**

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Químico

**AUTOR:**

DAVID ESTEBAN CARCHI MAURAT

**DIRECTORA:**

MARÍA ELENA CAZAR RAMÍREZ PhD

CUENCA – ECUADOR

2014



## RESUMEN

La celulosa es un material abundante en la naturaleza que se puede obtener a partir de cualquier organismo vegetal y es un constituyente de los residuos agrícolas del cultivo de banano.

El Ecuador posee grandes extensiones de terreno de este cultivo, pero de la planta únicamente se aprovecha el fruto. Dado que la celulosa es un material muy importante en el comercio global su extracción de los residuos puede generar valor para los agricultores.

La celulosa cuando se encuentra en escala nanométrica sea por tratamientos químicos o físicos muestra propiedades extraordinarias que pueden utilizarse para crear materiales de características únicas.

En el presente trabajo de investigación se introduce las bases teóricas y prácticas para una posible extracción a futuro de Nanocelulosa a partir de residuos agrícolas provenientes del cultivo de banano.

Se estudió la variedad de banano Grand Cavendish y se encontró que las partes de la planta conocidas como tallo floral y pseudotallo poseen 26,86 % y 37,85 % de celulosa respectivamente. Además se obtuvo celulosa nanocristalina por hidrólisis ácida de la celulosa obtenida a partir de las mencionadas partes con una relación longitud/diámetro igual a 16,16.

**Palabras clave:** *Celulosa, escala nanométrica, pseudotallo, tallo floral, celulosa nanocristalina.*



## ABSTRACT

Cellulose is a ubiquitous material that can be extracted from any organism of the plant kingdom and it is a part of banana crops residue.

Ecuador is one of the main banana producers of the world. The residues produced in this industrial culture may yield profit by means of cellulose extraction.

Nanometric cellulose shows outstanding properties that can be used to create new materials with unique properties.

The present work introduces theoretical and practical bases to produce nanocellulose from banana crops residues.

Grand Cavendish banana variety was studied. Our results shows that pseudostem and flower stem have 37.85 % and 26.86 % of cellulose; respectively besides nanocrystalline cellulose was produced with an aspect ratio of 16.16 using acid hydrolysis.

**Keywords:** *Cellulose, nanometric scale, pseudostem, flower stem, nanocrystalline cellulose*



## ÍNDICE

### Contenido

PORTADA.....	1
RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
ÍNDICE .....	4
LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABLAS .....	8
LISTA DE ANEXOS .....	8
DEDICATORIA .....	11
AGRADECIMIENTOS.....	11
INTRODUCCIÓN .....	12
CAPÍTULO I .....	13
1. MARCO TEORICO .....	13
1.1 RESIDUOS AGRÍCOLAS .....	13
1.2 COMPONENTES DE LA MATERIA LIGNOCELULÓSICA .....	14
1.2.1 CELULOSA .....	16
1.2.2 HEMICELULOSA .....	23
1.2.3 LIGNINA .....	24
1.2.4 EXTRACTOS .....	26
1.2.5 CENIZAS .....	26
1.3 RESIDUOS AGRÍCOLAS DE BANANO .....	27
1.3.1 ASPECTOS BOTÁNICOS .....	28
1.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	28
1.3.3 FENOLOGÍA DEL CULTIVO EN CONDICIONES NATURALES .....	30
1.3.4 COSECHA Y POSCOSECHA .....	31
1.3.5 DESTINO Y UTILIDAD DE LOS RESIDUOS DE BANANO .....	32
1.4. NANOCELULOSA .....	35
1.4.1 NANOTECNOLOGÍA .....	35
1.4.2 TIPOS DE NANOCELULOSA.....	40
1.4.3 HIDRÓLISIS DE LA CELULOSA.....	42



1.4.4 PROPIEDADES .....	45
1.4.5 CARACTERIZACIÓN .....	46
1.4.6 APLICACIONES .....	46
CAPÍTULO II .....	49
2. METODOLOGÍA .....	49
2.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS .....	49
2.2 ANÁLISIS QUÍMICO DE PSEUDOTALLO Y TALLO FLORAL .....	51
2.3 OBTENCIÓN DE CELULOSA .....	57
2.3.1 PRE TRATAMIENTO PARA RESIDUOS DE BANANO .....	57
2.3.2 PREPARACIÓN DE LA PULPA DE CELULOSA .....	57
2.4 OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA .....	59
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA .....	60
CAPÍTULO III .....	66
3. RESULTADOS .....	66
3.1 CARACTERIZACIÓN DE PSEUDOTALLO Y TALLO FLORAL DE BANANO .....	66
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA .....	67
4. CONCLUSIONES .....	69
5. BIBLIOGRAFÍA .....	70



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la materia Lignocelulósica.....	15
Figura 2. Estructura primaria de la celulosa.....	17
Figura 3. Enlaces por puente de hidrógeno entre cadenas de celulosa.....	18
Figura 4. Celulosa $I_{\alpha} - I_{\beta}$ .....	19
Figura 5. Posiciones en la estructura de la celulosa en las que se pueden realizar modificaciones.....	22
Figura 6. Monómeros presentes en la Hemicelulosa.....	23
Figura 7. Estructura de la Lignina.....	24
Figura 8. Esquema de una planta de banano.....	29
Figura 9. Tareas de Poscosecha.....	31
Figura 10. Buckminster fullereno.....	37
Figura 11. Relación superficie volumen para un hexaedro regular.....	38
Figura 12. Nanofibras de celulosa a partir de diferentes fuentes.....	40
Figura 13. Celulosa Nanocristalina a partir de microfibras de celulosa.....	41
Figura 14. Hidrólisis ácida de la celulosa para producir NCC.....	42
Figura 15. Representación esquemática del asilamiento de NCC.....	43
Figura 16. Representación esquemática de la orientación de NCC en su fase isotrópica y anisotrópica.....	45
Figura 17. Filtro para vehículos AMSOIL.....	48
Figura 18. Ubicación de la Hacienda Nueva.....	49
Figura 19. Preparación de las muestras para análisis.....	50
Figura 20. Preparación de pseudotallo para análisis.....	51
Figura 21. Laboratorio de Bromatología. Universidad de Cuenca.....	52
Figura 22. Determinación de humedad.....	53
Figura 23. Determinación de cenizas.....	53
Figura 24. Determinación de elementos solubles en benceno etanol.....	54



Figura 25. Determinación de hemicelulosa.....	54
Figura 26. Imagen izquierda corresponde a tallo floral al final del tratamiento con NaOH al 1%. Imagen de la derecha corresponde al pseudotallo en la misma instancia.....	55
Figura 27. Determinación de lignina.....	55
Figura 28. Determinación de celulosa.....	56
Figura 29. Etapa final extracción de celulosa.....	56
Figura 30. Fibras secas de pseudotallo y tallo floral juntas.....	57
Figura 31. Extracción de celulosa de los residuos de banano.....	58
Figura 32. Proceso de blanqueamiento de la celulosa.....	59
Figura 33. Lignina removida y celulosa blanqueada.....	59
Figura 34. Obtención de nanocelulosa.....	60
Figura 35. Suspensión coloidal lechosa de nanocelulosa.....	60
Figura 36. Superior: cuarto de preparación de muestras. Inferior: Preparación de la muestra a observar en el TEM. ....	61
Figura 37. Superior: preparación del TEM para observar la muestra. Inferior: búsqueda de nanocelulosa.....	63
Figura 38. Izquierda: preparación de la muestra con tinción. Derecha: observación de nanopartículas de celulosa.....	64
Figura 39. Fotografías de nanocristales de celulosa obtenidas con el TEM.....	64
Figura 40. Fotografía en la que se observa la rotura de la película de soporte.....	65
Figura 41. Image J software.....	67



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina de algunos residuos agrícolas y desperdicios.....	14
Tabla 2. Superficie, Producción y Rendimiento de banano en el Ecuador.....	27
Tabla 3. Constituyentes de los residuos agrícolas de banano.....	33
Tabla 4. Posibles usos de los residuos lignocelulósicos de banano.....	34
Tabla 5. El crecimiento de la nanotecnología.....	37
Tabla 6. Tamaño de NCC aislado de diferentes fuentes de Celulosa.....	44
Tabla 7. Whiskers de celulosa preparados en diferentes condiciones.....	44
Tabla 8. Lista de normas TAPPI para análisis de constituyentes de tallo floral y pseudotallo.....	52
Tabla 9. Composición de los residuos de banano.....	66
Tabla 10. Cantidad de constituyentes de los residuos considerando 1000 g.....	66
Tabla 11. Estimación de la cantidad de celulosa que se pudo aprovechar en los últimos años en nuestro país.....	67
Tabla 12. Izquierda: Medición de longitud. Derecha: Medición de ancho.....	68

## LISTA DE ANEXOS

### ANEXO 1. CÁLCULOS CARACTERIZACIÓN



Universidad de Cuenca



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, David Esteban Carchi Maurat, autor de la tesis “Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 7 de marzo de 2014

---

David Carchi  
0104029046

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*  
Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316  
e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103  
Cuenca - Ecuador

Universidad de Cuenca



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, David Esteban Carchi Maurat, autor de la tesis "Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Químico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 7 de marzo de 2014

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser la de David Carchi.

---

David Carchi  
0104029046

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316  
e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103  
Cuenca - Ecuador



## DEDICATORIA

El esfuerzo puesto en esta investigación está dedicado a Dios, a mis padres y hermanos por las alegrías y enseñanzas en este diario vivir.

## AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización del presente trabajo:

A Mis padres y hermanos por su apoyo incondicional.

A María Elena Cazar Ramírez PhD por guiar la elaboración de esta Tesis y por brindarme sobre todo su amistad.

A las autoridades y personal de la Facultad de Ciencias Químicas por mostrarme toda su disposición, especialmente a la Ing. Ruth Cecilia Álvarez por su apoyo, a mi amigo Ing. José Serrano por brindarme su ayuda en la caracterización de los residuos y en la obtención de celulosa, y a Gerardo Jimbo por sus historias y anécdotas.

A María Eulalia Vanegas PhD por su asesoría en el inicio de este proyecto.

Al Ing. Carlos Aniad por proveerme de los residuos del cultivo de banano.

Al Ing. Ignacio Sotomayor y al personal del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria del Ecuador por su información.

A la Ing. Sara Guerra y al personal del laboratorio de microscopía electrónica de la Escuela Superior Politécnica del Ejército por ayudarme en la obtención de las imágenes de la Nanocelulosa.



## INTRODUCCIÓN

Las necesidades cada vez más exigentes de los consumidores en el mercado mundial son las que llevan a la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales, por lo que en los últimos años se ha dado importancia al empleo de fibras vegetales por medio de la nanotecnología y así reemplazar en algunas aplicaciones industriales a las fibras sintéticas que en muchas ocasiones son grandes contaminantes.

Por fibras vegetales se entiende fundamentalmente a los elementos fibrosos de la pared de la célula vegetal; que incluye componentes, como celulosa, hemicelulosa y la lignina.

Entre estos componentes la celulosa es la que tiene mayor importancia en el desarrollo de materiales nanométricos debido a sus extraordinarias propiedades cuando se encuentra en esa escala.

El Ecuador posee muchas fuentes de fibras vegetales, quizá una de las más abundantes sea la que se encuentra como constituyente de la planta de banano, que luego de la cosecha pasa a ser un residuo de limitada utilidad para los agricultores.

Es así que en el presente trabajo se busca entender la importancia, propiedades, procedimientos de extracción y en medida de lo posible mostrar un camino hacia el aprovechamiento de dos partes de la planta de banano: pseudotallo y tallo floral.



## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEORICO

#### 1.1 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 (banano, mango, coco, piña), legumbres (tomate, soya, fréjol), algodón, y palma aceitera entre otros. (Singh nee' Nigam P. y A. 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 S. et al., 2011).

La composición química así como la microestructura morfológica de los materiales lignocelulósicos es extremadamente compleja debido a la organización jerárquica de los diferentes compuestos presentes en porciones heterogéneas.

Sin embargo se conoce que esta materia presenta una estructura constituida principalmente de polisacáridos lineales y cristalinos (Celulosa), heteropolisacáridos ramificados, no celulósicos y no cristalinos (Hemicelulosa), y un polímero fenólico heterogéneo con una estructura no entendida en su totalidad conocida como Lignina. (Kalia S. et al., 2011). En la tabla 1. Se muestra los porcentajes de lignocelulósicos en diferentes residuos.

Por sus constituyentes los residuos agrícolas pueden emplearse de diferentes maneras generando beneficios económicos y ambientales. (Singh nee' Nigam P. y A. Pandey, 2009; Mäkinen T. 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.

Materiales	Celulosa, %	Hemicelulosa, %	Lignina, %
Lignocelulósicos			
Maderas Duras	40-55	24-40	18-25
Maderas Suaves	45-50	25-35	25-35
Algodón	80-95	5-20	0
Papel	85-99	0	0-15
Bagazo de caña de azúcar	40-42	27-38	10-20
Paja de arroz	36-48	20-25	10-24
Paja de trigo	30	50	15
Cáscara de Nuez	25-30	25-30	30-40
Mazorca de Maíz	45	35	15
Hojas	15-20	80-85	0
Hierbas	25-40	35-50	10-30
Papel periódico	40-55	25-40	18-30

Tabla 1. Contenido de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina de algunos residuos agrícolas y desperdicios. (Schaffeld, 1994; Patel y Bhatt, 1992; citados en Singh nee' Nigam P. y A. Pandey, 2009)



## 1.2 COMPONENTES DE LA MATERIA LIGNOCELULÓSICA

Además de los constituyentes mayoritarios, Celulosa, Hemicelulosa y Lignina, existen algunos elementos minoritarios como los extraíbles por solventes orgánicos, y otros materiales inorgánicos. La composición química de las fibras depende de su origen, pero de una manera general se puede decir que corresponde una mayor parte a Celulosa, entre un 40 y 50%, aunque algunas veces es superior como en el caso del algodón; entre un 10 y 30% de Lignina y de 20 a 30% de Hemicelulosa. Estas últimas sustancias que son heteropolímeros presentan una gran variedad en su composición según las diferentes especies. El contenido de cenizas varía de una manera sustancial como en el caso de la madera cuyo contenido es inferior al 1% o en el caso de fibras naturales cuyo contenido normalmente es superior. (Hon D. y N. Shiraishi, 2001)

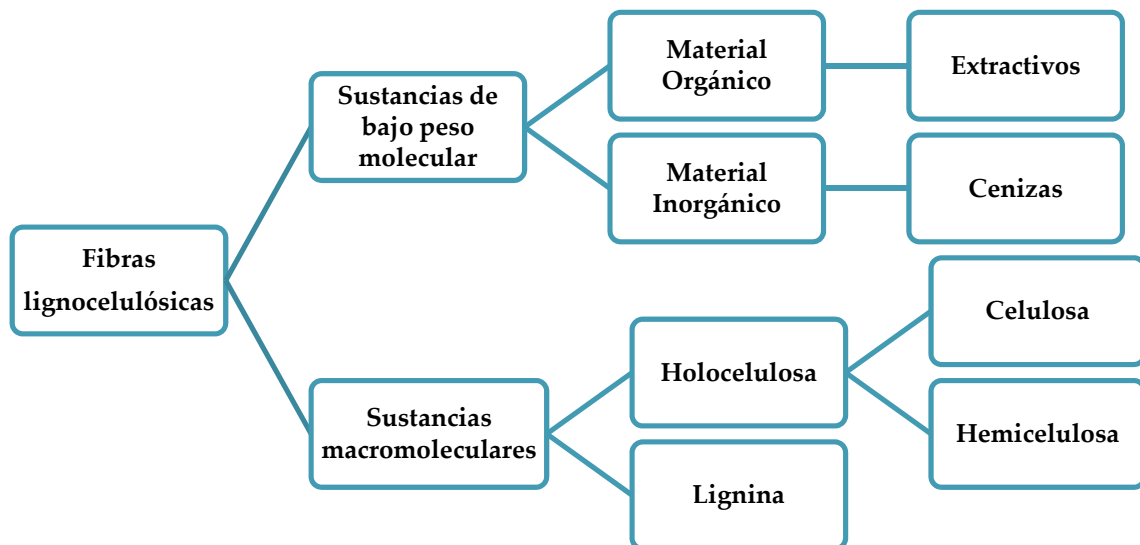


Figura 1. Componentes de la materia Lignocelulósica. (Gellerstedt G. 2009)



### 1.2.1 CELULOSA

Parafraseando a Marsh y Wood, no puede existir una mejor manera de presentar la mención de apertura a cualquier texto sobre celulosa que las palabras de Cross y Bevan en su libro “Celulosa” (Longmans, Green and Co, London; 1895):

*“La Celulosa es el constituyente predominante de los tejidos vegetales, y podría ser descrita brevemente como la base estructural del mundo vegetal”.* (Marsh J.T. y F.C. Wood, 1942:3)

Aunque la Celulosa es el principal componente de las plantas verdaderas (*Reino Plantae*), también otros organismos son capaces de sintetizarla como por ejemplo Urocordados (también llamados tunicados), Oomycotas, algunos tipos de algas (*Valonica ventricosa*), y también bacterias como la *Acetobacter xylinum*. De alguna manera la Celulosa ha sido “inventada” varias veces durante la evolución y a pesar de eso su estructura covalente es siempre idéntica aunque el patrón de agregación sea diferente entre diferentes organismos y aun entre tejidos de un mismo organismo. La función de la celulosa es siempre mecánica, y esto ocurre sea en forma pura como está en las fibras de la semilla de algodón, o mezclada con otros polisacáridos y lignina, como esta en la madera. (Henriksson G., 2009).

El conocimiento que se tiene de la composición química de la Celulosa es reciente, aunque se ha utilizado por varios milenios en la forma de algodón, lino y otras fibras textiles, o en la forma de madera para la construcción y papel. Fue el botánico francés Anselm Payen quien la aisló de plantas como residuo de intensas extracciones con álcali y acuñó su nombre. Además encontró que contenía entre 43.6 y 45% de Carbono, entre 6 y 6.5% de Hidrógeno y que el resto era Oxígeno. Teóricamente tiene 44.4% de Carbono y 6.2% de Hidrógeno. (Zugenmaier P., 2008)





### 1.2.1.1 ESTRUCTURA PRIMARIA O MOLECULAR

La Celulosa es un polímero lineal, no ramificado, de residuos de  $\beta$ -D- glucosa, unidos mediante enlaces  $\beta$ -1,4-glucosídicos. El grado de polimerización varía con su fuente y es usualmente expresado como un promedio, debido a que se ha encontrado una amplia distribución en la mayoría de las muestras. Han sido reportados valores de 14000 a 15000 residuos en una cadena, haciendo de la celulosa uno de los polisacáridos más largos. Como se ve en la Figura 2 cada segundo residuo de glucosa está rotado  $180^\circ$  respecto a su predecesor. Es así que el monómero o unidad repetidora de la celulosa es en realidad un residuo de celobiosa en lugar de un residuo de glucosa. Esta rotación ocasiona que la celulosa sea altamente simétrica, ya que cada lado de la cadena tiene un número igual de grupos hidroxilo. (Hon D., 2001)

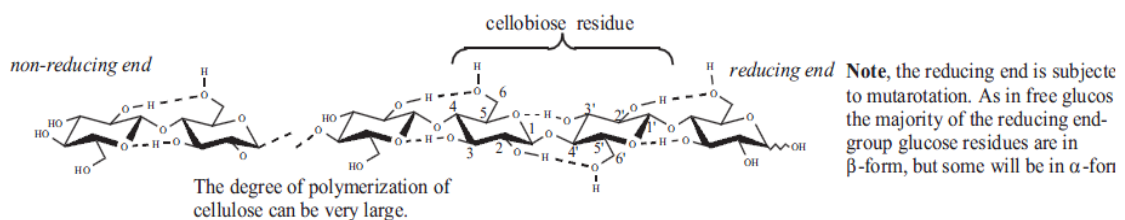


Figura 2. Estructura primaria de la celulosa. (Ek M., et al., 2009)

### 1.2.1.2 ESTRUCTURA SECUNDARIA

Se ha observado que la estructura primaria de la celulosa es relativamente simple, por lo que las propiedades de su estructura secundaria son las que la determinan como un polisacárido interesante para los campos biológicos y técnicos. (Henriksson, 2009).



### I. Patrón de los Enlaces de Hidrógeno

Dos enlaces de hidrógeno – entre el hidroxilo C6 y el hidroxilo C2 y entre el oxígeno C5 y el hidroxilo C3 – estabilizan el enlace glucosídico y hacen firme a la estructura.

Existen además enlaces de hidrógeno entre cadenas de celulosa formando láminas o fibrillas elementales. El enlace está localizado entre los hidroxilos C6 y C3, como se muestra en la Figura 3.

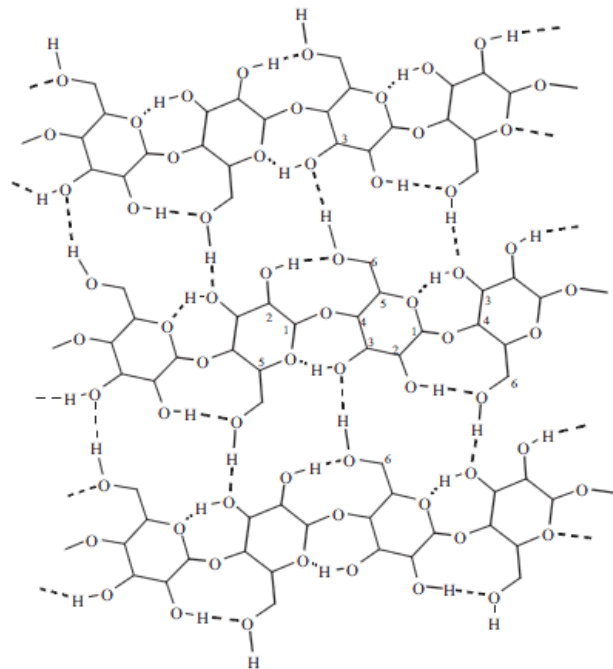


Figura 3. Enlaces por puente de hidrógeno entre cadenas de celulosa. (Henriksson G., 2009)

En estas láminas las cadenas del polímero están orientadas, con un alineamiento paralelo, y unidas firmemente por numerosos puentes de hidrógeno muy fuertes. (Henriksson G., 2009)



## II. Interacción de las Láminas de Celulosa

Las láminas de Celulosa están apiladas entre sí e interactúan mediante fuerzas de Van der Waals, que producen un efecto global considerable a pesar de su debilidad, y de interacción  $\chi$  o “interacción hidrofóbica” que surge como consecuencia de la conformación en silla de la glucosa con los grupos hidroxilos apuntando hacia fuera. En estas formaciones no intervienen los enlaces de puente de hidrógeno.

Ahora bien, cuando las láminas de celulosa se ligan unas a otras, pueden tomar dos formas diferentes de cristal conocidas como  $I_\alpha$  y  $I_\beta$ . Esto se debe a que los residuos de glucosa de diferentes láminas no se apilan directamente unas sobre otras y se produce un desplazamiento en la posición de las láminas adyacentes de celulosa. (Henriksson G., 2009)

Mediante la Figura 3 se puede entender que cuando la tercera lámina es desplazada en la misma dirección que la segunda se tiene Celulosa  $I_\alpha$  y en dirección opuesta Celulosa  $I_\beta$ .

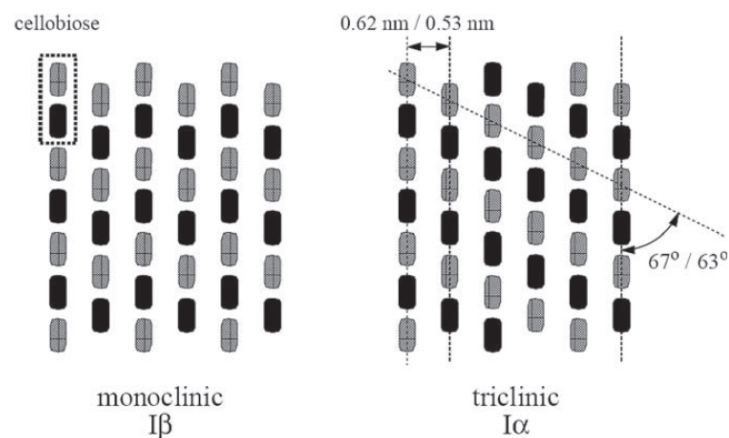


Figura 4. Celulosa  $I_\alpha - I_\beta$ . (Baker et al, 1997 citado en Zugenmaier P., 2008.)



Además existe diferencias en el patrón de enlace por puente de hidrógeno entre la Celulosa  $I_{\alpha}$  –  $I_{\beta}$ . Como resultado de todo esto los cristales presentan configuraciones distintas, con una Celulosa  $I_{\alpha}$  de forma triclinica y la  $I_{\beta}$  de forma monoclinica. Se piensa que las dos formas coexisten de forma nativa en el algodón, madera, lino, etc.

Como ya se mencionó anteriormente las láminas relativamente estrechas forman fajos altamente organizados llamados fibras. A pesar de que determinar su forma y tamaño es una tarea complicada, debido a que tiene una alta tendencia a formar agregados fibrilares, y a que el tamaño varía entre organismos y tejidos, inclusive entre las paredes celulares, se considera que 36 cadenas forman una fibra, pero probablemente este valor sea mayor o menor. En las plantas las fibras aparecen como paralelepípedos de bases cuadradas y lados rectangulares, pero en la *Acetobacter* puede ser mucho más plana, como la forma de una banda larga.

En resumidas cuentas se puede considerar que los cristales tienen diferentes enlaces en cada dimensión, estando en la primera dimensión los enlaces covalentes provocados por algunos puentes de hidrógeno a lo largo de las cadenas celulósicas, que nos daría la longitud y como consecuencia de un grado de polimerización muy alto, fibras muy largas. En la segunda dimensión están los enlaces de hidrógeno que mantienen a las cadenas juntas en láminas. Mientras que las fuerzas de Van der Waals y la interacción  $\chi$  que permiten la formación de fibrillas están en la tercera dimensión. (Henriksson, 2009)

### 1.2.1.3 ORGANIZACIÓN SÚPER FIBRILAR DE LA CELULOSA

Las fibras de Celulosa tienden a agregarse en unidades muy grandes por un proceso que todavía no está muy claro. Se ha sugerido que la presencia de hemicelulosa juega un papel fundamental y que la agregación se produce mayoritariamente en la pared secundaria de la célula en las plantas. (Henriksson, 2009).

En este punto es importante mencionar que las fibras de Celulosa presentan regiones de alta cristalinidad y regiones menos ordenadas, semi cristalinas,



identificadas como amorfas. Las Celulosas de alta cristalinidad en la naturaleza se encuentran en el algodón, en la bacteria *Acetobacter xylinum* y en el alga *Valonia ventricosa*.

Una característica importante del arreglo cristalino es que los componentes moleculares de las fibrillas individuales están empacados muy rígidamente de manera que previene la penetración de enzimas, y también de moléculas pequeñas como el agua. Mientras que la región desordenada permite la desintegración de la Celulosa por hidrólisis a pequeñas partículas usando una solución acuosa de ácido fuerte. (Zugenmaier, 2008).

#### 1.2.1.4 OTRAS FORMAS CRISTALINAS DE CELULOSA

Existen varias estructuras secundarias que pueden formarse por varios tratamientos químicos, y es así que se conoce de Celulosa tipo II, III, IV. La Celulosa tipo II es la más importante ya que es usada como fibra regenerada, un material muy útil en la industria textil, que se puede obtener principalmente por mercerización en una solución de hidróxido de sodio al 18%. La diferencia entre el tipo II y I, es que cada cadena tiene polaridad diferente a la de su vecina, generando mayor cantidad de enlaces de hidrógeno por residuo de glucosa. Esta es probablemente la explicación de que el tipo II es la forma termodinámicamente estable de la celulosa. El cristal en el tipo II es monoclinico. (Henriksson, 2009).

#### 1.2.1.5 PROPIEDADES

La Celulosa posee propiedades inusuales al compararla con otros polisacáridos, debido a su alto grado de polimerización, a las interacciones fuertes y regulares entre cadenas y a la organización de las fibras.

A pesar del gran número de grupos hidroxilos que posee es insoluble en agua y en la mayoría de solventes orgánicos. Esto no significa que interactúe pobremente en agua, de hecho su superficie es altamente hidrofílica, como por ejemplo el algodón puede absorber diez veces su peso en agua. Durante el secado de Celulosas húmedas, pulpa de papel por ejemplo, las fibras sufren un fenómeno no entendido completamente, conocido como hornificación (hornification en inglés) volviéndose inflexibles. Además es insoluble en álcalis fuertes. (Henriksson, 2009).



Es un material que interactúa con los tejidos vivos de forma segura. Es biodegradable y reciclable.

1.2.1.6 REACTIVIDAD DE LA CELULOSA

Por las propiedades que presentan los materiales celulósicos, se han buscado técnicas de modificación para reforzar estas características originales o bien añadir nuevas funciones. Los procedimientos químicos han abarcado la mayor cantidad de investigación realizada ya que se puede copar total o parcialmente los grupos hidroxilos de las unidades monoméricas de la Celulosa.

Las modificaciones típicas son esterificaciones y eterificaciones de los grupos hidroxilos, logrando cambios drásticos en las propiedades originales de la Celulosa. Además se puede insertar radicales e iones; alcanzar acetilaciones y oxidaciones. (Hon D. y Shiraishi N., 2001).

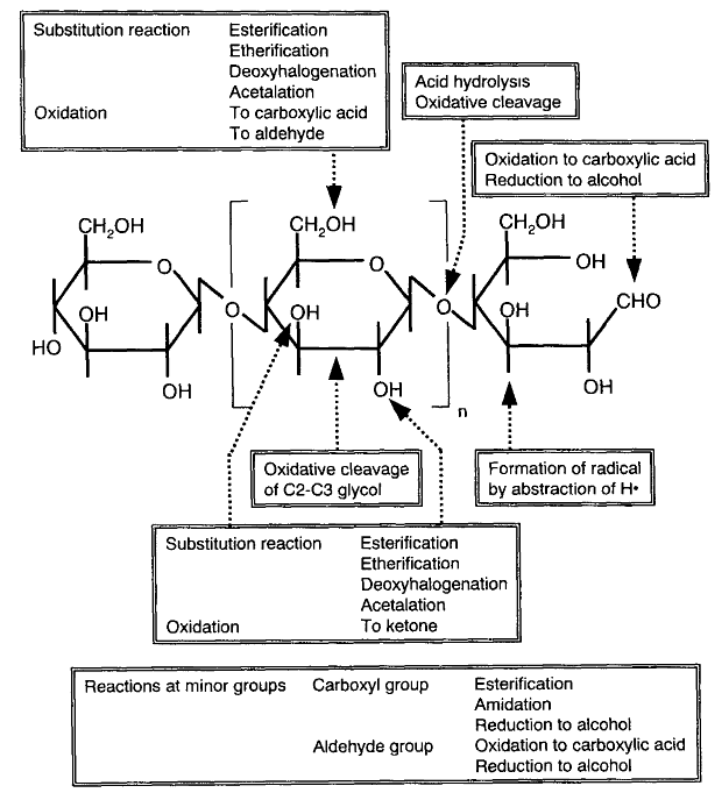


Figura 5. Posiciones en la estructura de la celulosa en las que se pueden realizar modificaciones. (Hon D. y Shiraishi N., 2001).



### 1.2.2 HEMICELULOSA

En el año de 1891 E. Schulze propuso el nombre de Hemicelulosa a los polisacáridos extraídos de plantas mediante soluciones alcalinas diluidas. Se asumía que estos polisacáridos estaban relacionados química y estructuralmente con la Celulosa e hidrolizaban con mayor facilidad. En realidad la hemicelulosa está compuesta de diferentes azúcares formando cadenas más cortas y con ramificaciones, pero de bajo peso molecular comparado con la Celulosa.

Sus principales constituyentes son hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa), pentosas (D-xilosa y L-arabinosa), pequeñas cantidades de deoxyhexoses (L-ramnosa y L-fucosa) y ciertos ácidos urónicos (4-O-metil-D-glucurónico, D-galacturónico y D-glucurónico). Su estabilidad térmica y química es generalmente inferior que de la Celulosa, siendo soluble en álcalis y fácilmente hidrolizada por ácidos. (Teleman A.; en Ek M., 2009).

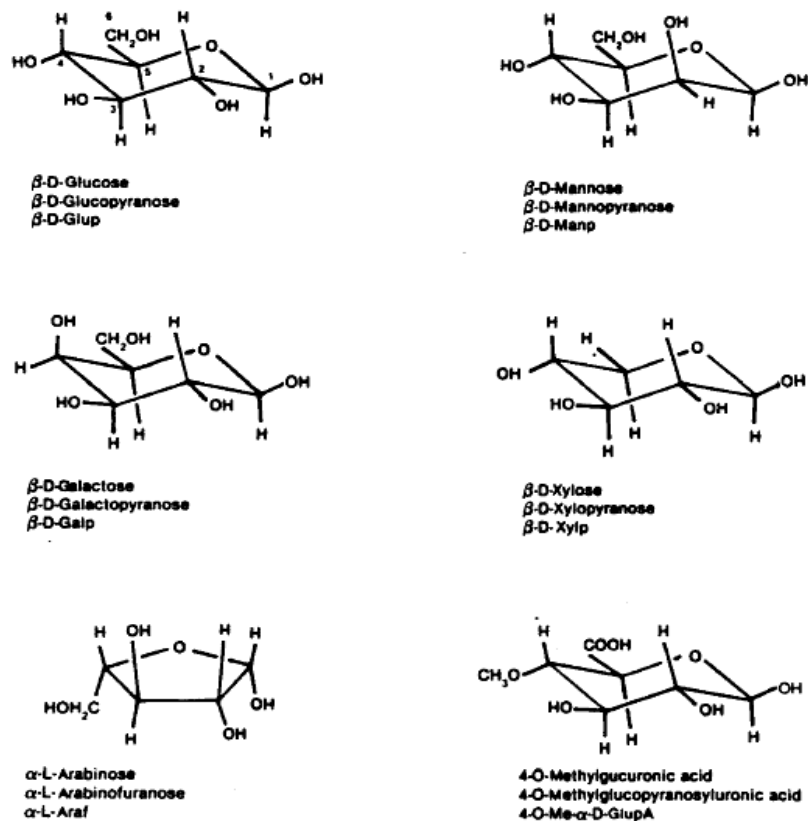


Figura 6. Monómeros presentes en la Hemicelulosa. (Pettersen R., 1984).



La denominación habitual que reciben los diferentes heteropolímeros que forman la hemicelulosa se deriva del monómero mayoritario. Por ejemplo la hemicelulosa predominante en muchas paredes primarias es el xiloglucano. Otras son arabinoxilano, glucomanano, galactomanano y glucoronoxilano.

La hemicelulosa puede ser extraída por soluciones alcalinas (por ejemplo KOH al 15%), precipitando una parte (xilanos y hemicelulosa tipo A) cuando la solución es neutralizada y otra parte de bajo peso molecular (polisacáridos ácidos o hemicelulosa tipo B) al añadir etanol. (Pettersen R., 1984).

### 1.2.3 LIGNINA

La lignina es un polímero hidrófobo que se encuentra en los espacios entre las fibrillas de celulosa y hemicelulosa, fijándolas juntas. La lignina es toda una rareza entre las biomoléculas ya que no es del todo polisacárido, lípido, proteína o nucleótido. Posee una estructura muy compleja, en un entramado tridimensional, cuyos monómeros están conectados por enlaces del tipo éter (C-O-C) y de Carbono – Carbono (C-C) aleatoriamente distribuidos.

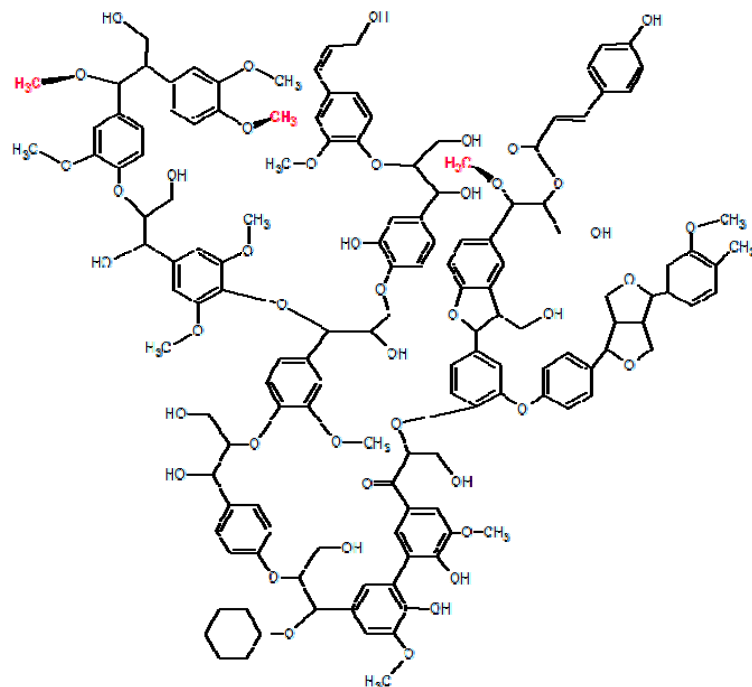


Figura 7. Estructura de la Lignina. (Henriksson, 2009).





La lignina aparece en todas las plantas con sistemas vasculares, sin embargo en plantas no leñosas aparece en menor cantidad (1-20%).

Su rol en las plantas consiste en brindar dureza a las paredes celulares, junto con la celulosa y hemicelulosa, sirviendo como soporte mecánico para construir el tallo y ramas, que de ese modo dan a la planta mayores chances de competir por luz solar. También aglutina diferentes células para formar tejidos leñosos e impermeabiliza la pared celular lo que se supone es la clave de la evolución de las plantas vasculares.

Esa riqueza en lignina de algunas especies de plantas las hace más resistentes a la degradación biológica ya que forma tejidos compactos en los que las proteínas degradantes de polisacáridos excretadas por microorganismos no pueden penetrar por la pared celular. (Henriksson, 2009).

Tiene una estructura derivada de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico).

Estas estructuras están ligadas mediante multitudes de enlaces inter unitarios que incluyen varios enlaces éter ( $\beta$ -0-4,  $\alpha$ -0-4, 4-0-5) y C-C. Estas estructuras son muy complejas y dependen de la especie de la planta del que se obtiene la lignina, el proceso de pulpeo usado para fraccionarla de la celulosa, y del método utilizado para su recuperación de las lejías papeleras o licor negro. (Glasser, 1989; citado en Nour-Eddine El Mansouri J., 2001).

La mayor cantidad de ligninas se destina para obtener energía como combustible de calderas en la industria papelera. Solamente de 1 a 2% se aísla del licor negro y se destina a usos industriales diversos que incluyen la fabricación de tableros aglomerados y contrachapados, biodispersantes, surfactantes, espuma de poliuretano, resina epoxi y resinas fenólicas. (Lora, 2002; citado en Nour-Eddine El Mansouri J., 2001).



#### 1.2.4 EXTRACTOS

Se puede definir a los materiales extractivos como los compuestos químicos que se pueden extraer por medio de varios solventes neutros. Esto significa que el solvente y el procedimiento de extracción deben ser especificados.

Los materiales que corresponden a la definición anterior constituyen entre el 4 y 10% del peso en base seca de especies madereras que crecen en climas templados y hasta el 20% de especies de clima tropical (Pettersen R., 1984). Se incluyen dentro de este grupo carbohidratos de bajo peso molecular como terpenos, ácidos alifáticos y aromáticos, alcoholes, flavonoides, proteínas, mucílagos, gomas, resinas, taninos, alcaloides, ceras, aceites esenciales, etc. Muchas de estas sustancias intervienen en el metabolismo, como reservas de energía, o son parte de las defensas contra ataques microbianos. Contribuyen con propiedades como color y olor de las plantas. (Pettersen R., 1984).

#### 1.2.5 CENIZAS

Las cenizas son las sustancias inorgánicas que se pueden determinar por incineración del material lignocelulósicos a temperaturas entre 525 y 900 °C. Fundamentalmente son las sales inorgánicas de calcio, potasio y magnesio, así como sílice. Forman carbonatos, fosfatos, oxalatos y silicatos. Usualmente representa alrededor del 1% en maderas de climas templados y puede ser mayor en aquellas de climas tropicales. (Pettersen R., 1984)



### 1.3 RESIDUOS AGRÍCOLAS DE BANANO

El banano es una fruta altamente nutritiva, muy popular por su aroma, textura, facilidad de pelar y comer, además es rico en potasio y calcio, a la vez que posee bajos niveles de sodio (Wall M., 2006; citado en Mohapatra et al, 2010).

Fue a partir del año de 1951 que el Ecuador se estableció como uno de los mayores exportadores de banano en el Mundo, manteniéndose hasta años recientes en los que aparece con dominio del 32% del Comercio Mundial de banano. (AEBE, 2010). Se muestra en la tabla 2 Tanto la producción como rendimiento por hectárea en nuestro país desde el año 2000.

<b>Año</b>	<b>Superficie Sembrada ha</b>	<b>Superficie Cosechada ha</b>	<b>Producción t</b>	<b>Rendimiento t/ha</b>
2000	266125	252570	5512204	21,82
2001	255470	244318	5611896	22,97
2002	237859	229622	5611438	24,44
2003	243949	233813	6453806	27,60
2004	240009	226521	6132276	27,07
2005	232780	221085	6118425	27,67
2006	221107	209350	6127060	29,27
2007	211843	197410	6002302	30,41
2008	233427	215521	6701146	31,09
2009	229602	216115	7637324	35,34
2010	235773	215647	7931060	36,78
2011	200110	191973	7427776	38,69
2012	221775	210894	7012244	33,25

Tabla 2. Superficie, Producción y Rendimiento de banano en el Ecuador. (SINAGAP, 2013)



### 1.3.1 ASPECTOS BOTÁNICOS

El banano es una planta monocotiledónea perteneciente a la familia de Musáceas, género *Musa*, cuyas variedades han sufrido varios cruzamientos hasta llegar a las que se cultivan hoy en día. (Orellana et al, 2008)

De manera general dentro del género *Musa* existen una gran variedad de especies que tienen importancia comercial que son empleadas en alimentación (*Musa acuminata* y *Musa balbisiana*), industria papelera (*Musa velutina*, *Musa sanguínea*), fibras textiles y artesanías (*Musa textilis*). Además existen otras especies como *Musa coccínea* que tienen interés ornamental (Jiménez J., 2006).

Retomando la especie que involucra este estudio, el banano corresponde a las variedades comestibles del género *Musa*. Estas se originaron a partir de la hibridación intra e interespecífica de las especies silvestres ya mencionadas: *M. acuminata* y *M. balbisiana*, que contribuyeron con los genomas A y B, respectivamente. La poliploidía e hibridación dieron origen a una cantidad de clones diploides, triploides y tetraploides, con diferentes intercambios de genomas A y B. Como consecuencia la mayoría de los cultivos involucran bananos AA, AAA, plátanos AAB y bananos de cocción ABB. (Orellana et al, 2008)

En el Ecuador se producen variedades del Grupo AAA, como el Gros Michel o guineo de seda que es muy susceptible al mal de Panamá por lo que se lo cultiva a escala pequeña, y la variedad Cavendish que es la más difundida por su resistencia a diferentes enfermedades. Destacan varios tipos de la variedad Cavendish en el país como el Lacatan o Filipino, Poyo, Valery, Robusta, Giant Cavendish, Cavendish Enano y Grand Nain. (Jiménez, J., 2006)

### 1.3.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Las plantas de banano poseen un sistema radicular formado por un eje donde se producen las raíces primarias y a partir de estas se desarrollan otras secundarias. Las raíces miden entre 1 y 2 metros aunque pueden ser mayores, y se ubican



cerca de la superficie del suelo. Las raíces continúan hacia el cormo o tallo subterráneo que es la estructura que sustenta el crecimiento de la planta y da origen a las hojas de la parte superior.

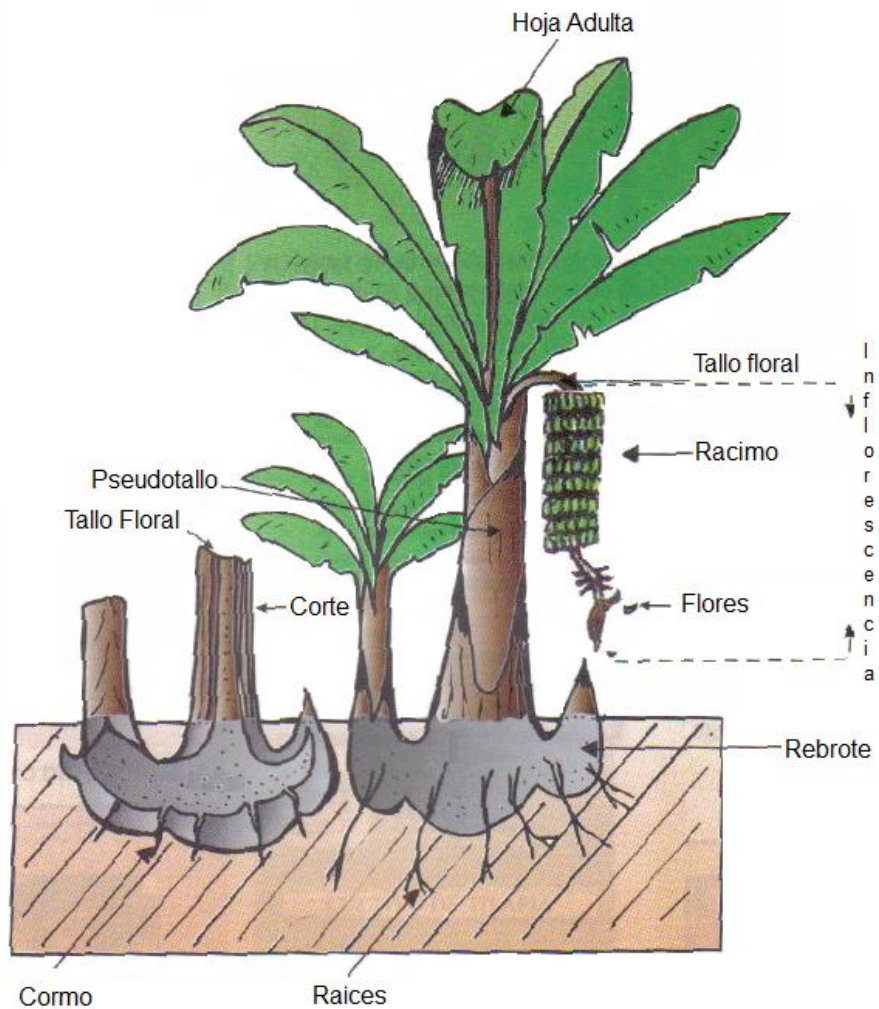


Figura 8. Esquema de una planta de banano. (Fernández A., 2006; citado en Noblecilla E., 2008)

Las vainas envolventes de las hojas dan lugar al pseudotallo o tallo aéreo que se origina en el cormo y termina en la inflorescencia. Conecta vascularmente las



raíces, hojas y frutos. Es una estructura resistente que permite soportar el peso de las hojas y los racimos que pueden llegar a pesar 75 kilogramos.

Las hojas, que tienen una forma alargada, oval y de gran tamaño, se desarrollan de modo distinto de acuerdo a la edad de la planta y van muriendo de manera sucesiva previamente a la aparición de la inflorescencia.

En una fase biológica determinada el meristemo apical (estructura ubicada en la base del pseudotallo) deja de producir hojas e inicia la producción de una inflorescencia en donde las hojas son reemplazadas por brácteas y también aparecen grupos de flores posicionadas en hileras. Además se desarrollan en las flores femeninas frutos individuales o dedos que conjuntamente se conoce como manos. Dependiendo de la variedad, la planta de banano puede medir entre 2 y 5,3 metros. (Orellana et al, 2008)

### 1.3.3 FENOLOGÍA DEL CULTIVO EN CONDICIONES NATURALES

La fenología es el estudio de los fenómenos biológicos que suceden a cierto ritmo periódico en el transcurso de la vida de las plantas. (Volpe, 1992; Villalpando y Ruiz, 1993; Schwartz, 1999; citados en MAGAP, 2012)

Se consideran tres fases en el desarrollo de las musáceas (INTA, 1997; citado en MAGAP, 2012):

- Fase Vegetativa: comprende la brotación, formación del cono superior, emisión de raíces (cormos), desarrollo de rebrotes, pseudotallo, emisión de hojas y diferenciación floral. Dura 6 meses.
- Fase Reproductiva: se caracteriza por la diferenciación de las flores. Dura 2 meses.
- Fase Productiva: se inicia al finalizar el proceso de diferenciación hasta concluir la cosecha. Dura 2 meses.

Todas estas etapas de cultivo son controladas mediante cintas de diferentes colores hasta alcanzar la madurez fisiológica. El objetivo del productor es



cosechar en un punto tan cercano como sea posible a ese estado para evitar que madure durante el transporte y almacenamiento, cuidando que el fruto mantenga la calidad propia de una fruta fresca.

Cada planta produce una sola cosecha y muere, sin antes dar lugar a varios brotes o hijos de los cuales fructifican en una media de dos o tres. Alcanzar un máximo aprovechamiento de la fruta radica en un buen planeamiento y control durante la cosecha. (Rodríguez A., 2009)

### 1.3.4 COSECHA Y POSCOSECHA

Una vez alcanzado el grado de desarrollo apropiado se realiza un corte en “V” a los lados del pseudotallo para que el racimo baje suavemente hacia el hombro del trabajador que deberá cuidar que no se estropee a la vez que lo coloca en el sistema de cables que se encuentran para facilitar el transporte del racimo hacia la sección de empaque. (Orellana et al, 2008)

Mientras el racimo es transportado el obrero deberá culminar su trabajo dejando caer el pseudotallo para su descomposición y así proveer de nutrientes orgánicos y agua a las futuras plantaciones.

En la empacadora el racimo es sometido a las tareas de poscosecha que se resumen en la figura 9 de manera que las manos queden listas para su exportación y comercialización.

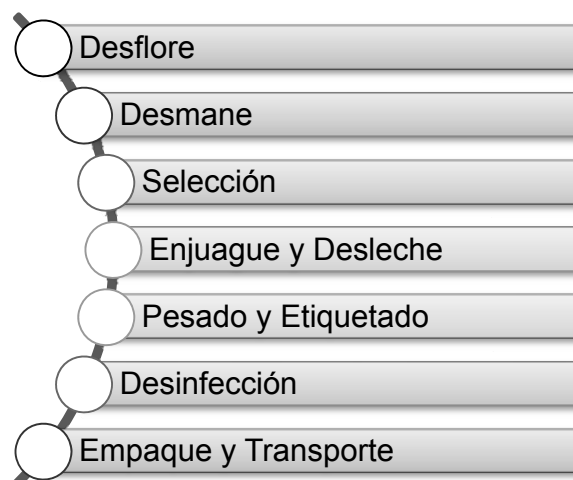


Figura 9. Tareas de Poscosecha. (Rodríguez A., 2009)



Durante la operación de desmane se separan las manos del tallo floral conocido también como raquis o pinzote, por medio de cortes evitando desgarros que puedan estropear la fruta. El corte se lo realiza de forma que se conserve una buena cantidad de corona manteniendo firmes los dedos, así estos al madurar no se desprenderán fácilmente. (Orellana et al, 2008)

### 1.3.5 DESTINO Y UTILIDAD DE LOS RESIDUOS DE BANANO

Se considera que el peso de una planta de banano al momento de la cosecha está entre 150 y 200 kilogramos al que corresponde, en promedio, 23 al racimo, 3.25 al raquis o pinzote luego de la tarea de desmane, 127 al conjunto de pseudotallo, hojas flor y corona. Además el peso de flor y corona es 0.35 kg por racimo. (Laprade, 2006; citado por Steiner R., 2006)

En otras investigaciones se indica que del 11 al 12% en peso de la planta de banano pertenece al fruto. (Cesey, 1990 citado en Molina et al 2012; Zuluaga et al, 2007)

Como se mencionó anteriormente aquellas porciones de la planta que quedan luego de retirar el fruto son encaminadas a devolver nutrientes y agua al suelo o bien son depositadas a orillas de las fincas, caminos, ríos o dentro de trincheras para evitar la proliferación de insectos perjudiciales. En el Ecuador se estima que cada año se producen alrededor de 351031 toneladas métricas de residuos lignocelulósicos libres de agua provenientes de las plantaciones de banano. (Carvajal et al, 2013)

Debido a la abundancia de estos residuos en cada uno de los países productores de banano algunos investigadores han buscado posibles aplicaciones para este material de desecho por lo que han realizado pruebas de caracterización obteniendo valores para cada constituyente. En la tabla 3 se muestra los resultados obtenidos por ellos.





Residuo	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina	% Extractivos	% Cenizas	Referencias
Pseudotallo	34,4 - 40	20 - 24	12	ND	14	Cordeiro et al, 2004; citado en Mohopatra et al, 2010
Pseudotallo	31,27±3,61	14,98±2,03	15,07±0,66	4,46±0,11	8,65±0,10	Bilba et al, 2007; citado en Mukhopadhyay et al, 2008
Pseudotallo	35,3	24,9	5,2	ND	ND	Paredes D., 2010
Pseudotallo	43,25 ± 3,59*		ND	23,14±8,3	13,54±0,32	Pereira et al, 2010
Pseudotallo	43,6	ND	11	ND	7,1	Kumar et al, 2011
Pseudotallo	54,86±1,58	ND	12,23±0,55	10,82±0,25	ND	Molina et al, 2012
Pseudotallo	55,48	ND	22,25	7,59	15,35	Rosal et al, 2012
Pseudotallo	61,5*		14,9	3,52	15,7	Khan et al, 2013
Raquis	47,6*		7,4	ND	ND	Aparecida, 2001; citado en Turrado et al., 2009
Raquis	31	31,7	10,5	ND	26,8	Oliveira et al, 2007; citado en Mohopatra et al, 2010
Raquis	38,13	36,74	13,09	ND	ND	Turrado et al., 2009
Raquis	30,6	15,7	9,85	ND	ND	Paredes D., 2010
Raquis	32,6	20,71	14,72	10	12	Guarnizo et al, 2011
Raquis	8,3	21,23	19,06	ND	15,73	Sugumaran et al, 2012

\*Valor corresponde a Holocelulosa, es decir Celulosa junto con Hemicelulosa  
 \*ND= No Disponible

Tabla 3. Constituyentes de los residuos agrícolas de banano.

Las discrepancias existentes en los valores obtenidos por cada autor pueden deberse a uno o varios de los siguientes factores (Rosal et al, 2012):

- Diferente variedad de banano empleada.
- Diferente fracción de la parte de la planta usada.
- Tipo de método empleado para el análisis.
- Presencia de materiales ajenos que pueden acompañar a los residuos de banano.

Existe en nuestro país emprendimientos que plantean la posibilidad de utilizar estos materiales lignocelulósicos para crear artesanías y papel principalmente. En



la investigación realizada por Cabanilla e Intriago (2009: 7 – 13) se presenta algunos ejemplos de manufactura de artesanías como el de la Asociación de Mujeres emprendedoras del Triunfo en la provincia del Guayas y el de la Asociación de Mujeres Agro artesanales en Pasaje provincia del Oro. En estas se elaboran canastas, sombreros, carteras y muñecas entre otras cosas tejiendo las fibras de la planta de banano. Por otro lado se describe a la empresa Ecopapel ubicada en Bahía de Caráquez provincia de Manabí que mezcla papel reciclado con fibras de banano para formar sobres, tarjetas, agendas, porta retratos, etc.

Otras aplicaciones industriales también han sido exploradas. Algunas de ellas se enlistan en la Tabla 4.

<b>Usos de los residuos lignocelulósicos de banano</b>	<b>Referencia</b>
Harina de raquis	Mazzeo et al, 2010
Papel	Aguilar et al, 2007; Turrado et al, 2009; Mazzeo et al, 2010; Rosal et al, 2012
Fibra de refuerzo en resina poliéster	Pothan et al, 2003; citado en Mukhopadhyay et al, 2008
Fibra de refuerzo en fenol formaldehido	Joseph et al, 2002; citado en Mukhopadhyay et al, 2008
Fibras, Papel y Filmes	Kumar et al, 2011
Obtención de alcohol carburante	Guarnizo et al, 2011; Rosal et al, 2012; Camargo et al, 2012
Producción de carbón activado a partir de raquis	Sugumaran et al, 2012
Producción de metabolitos secundarios por fermentación con el hongo <i>Lentinus Crinitus</i>	Grandar et al, 2005
Whiskers de celulosa para refuerzo de nanocompuestos	Bolio et al, 2011
Nanocompuestos reforzados con microfibrillas de celulosa	Restrepo et al; 2007
Sustrato para la obtención de enzimas celulasas	Paredes D., 2010

Tabla 4. Posibles usos de los residuos lignocelulósicos de banano.



#### 1.4. NANOCELULOSA

Los materiales nanométricos han ganado el interés científico en los últimos años, debido a sus extraordinarias propiedades eléctricas, mecánicas, térmicas, etc. Estos materiales por definición deben tener al menos una de sus dimensiones en el rango del nanómetro.

En esa misma tendencia la extracción y producción de nanocelulosa a partir de varias fuentes ha adquirido un creciente interés debido a su abundancia, resistencia, rigidez, bajo peso y biodegradabilidad.

Para tener una mejor comprensión de los nanomateriales es importante primero entender algunos de sus fundamentos.

##### 1.4.1 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, 2009:20).*

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. (Ramsden J., 2009).

#### 1.4.1.1 HISTORIA

En Diciembre de 1959 en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física en el Instituto de Tecnología de California, Richard Feynman brindo un famoso discurso titulado “There’s Plenty of Room at the Bottom” (“Hay mucho espacio en el fondo”) en la que básicamente planteó el problema de controlar y manipular objetos un átomo a la vez. El previó la posibilidad de máquinas capaces de ensamblar por sí mismas materiales nanoestructurados. Pero el término vería la luz por primera vez en 1974 en una conferencia de la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Precisión a cargo del profesor Norio Tanaguchi en un artículo titulado “On the Basic Concept of Nanotechnology” (“Sobre el concepto básico en Nanotecnología”).

Sin embargo la carencia de herramientas adecuadas limitaría la materialización de las ideas planteadas en estos discursos, hasta que en el año de 1981 G. Binnig y H. Rohrer crearon el microscopio de efecto túnel abriendo la posibilidad de ver y manipular átomos y moléculas. En ese mismo año una de las ideas de Feynman sería abordada por Eric Drexler llevándolo a generar el concepto de *Ensamblador* como un nano objeto capaz de realizar copias de sí mismo y otras máquinas u objetos sin importar su complejidad ensamblándolos molécula a molécula (FECYT, 2009).

Por otro lado, en 1985, un nuevo tipo de carbono con la forma de balón de fútbol y caracterizado por el ordenamiento simétrico de sus 60 átomos sería descubierto por Richard Smalley, W. Kroto y su equipo. Esta forma distinta a las conocidas de diamante y grafito, despertaría el interés entre los científicos que vislumbrarían aplicaciones como en la electrónica molecular. Este tipo de estructuras recibiría el nombre de fullerenos o “bucky-balls” en honor a Richard Buckminster Fuller quien



fuera diseñador de cúpulas geodésicas basadas en pentágonos y hexágonos (Williams L. y W. Adams, 2007).

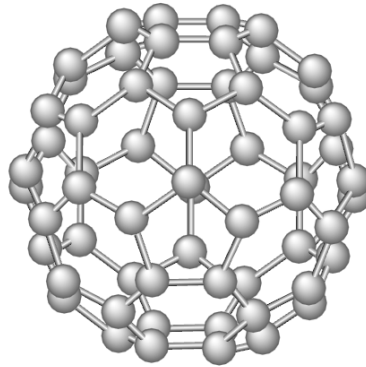


Figura 10. Buckminster fullereno (Williams L. y W. Adams, 2007)

Para el año de 1989 Don Eigler lograría dar un paso fundamental, al formar las iniciales de la empresa para la que trabajaba (IBM) colocando 35 átomos de xenón sobre una superficie de níquel (FECYT, 2009).

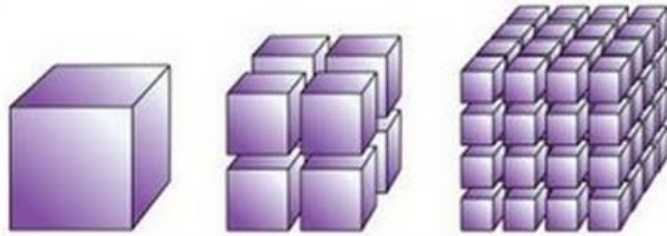
Año	Evento
1960	Feynman: "There is plenty of room at the bottom" (1959) Feynman, Tomonaga y Schwinger ganan el premio Nobel en Física por su trabajo en electrodinámica cuántica
1970	Xerox empieza el trabajo en la tecnología de tinta electrónica
1980	Inención del microscopio de efecto túnel (1981) Inención del microscopio de fuerza atómica (1986)
1990	Inención del microscopio de campo cercano (1990) Smalley, Curl y Kroto ganan el premio Nobel en química por el descubrimiento de los Fullerenos (1996)
2000	Universidad de Massachusetts y Amherst realizan que moléculas se auto ensamblen Nanoparticulas se dirigen para combatir células cancerígenas

Tabla 5. El crecimiento de la nanotecnología (Williams L. y W. Adams, 2007)



1.4.1.2 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 consideramos un objeto de dimensiones conocidas y calculamos su volumen y área para luego dividirlo en n partículas pequeñas vemos como a medida que se reduce su tamaño la superficie se ve incrementada mientras su volumen permanece constante (Ramsden J., 2009).



<b>a</b>	<b>V</b>	<b>S, una cara</b>	<b>N caras</b>	<b>S<sub>T</sub></b>		<b>V<sub>T</sub></b>	<b>S<sub>T</sub></b>	<b>S<sub>T</sub>/V<sub>T</sub></b>
8	512	64	6	384		512	384	
<b>a</b>	<b>V, c/cubo</b>	<b>S, una cara</b>	<b>N caras</b>	<b>S<sub>T</sub>, c/cubo</b>	<b>N cubos</b>			
4	64	16	6	96	8	512	768	1,5
2	8	4	6	24	64	512	1536	3
1	1	1	6	6	512	512	3072	6

Figura 11. Relación superficie volumen para un hexaedro regular. (Imagen de Boyle C., 2009; tabla elaborada por el autor)

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 J., 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 L. y W. Adams, 2007).

De la misma manera si consideremos 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 decidimos 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).



#### 1.4.2 TIPOS DE 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 (NCF) 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. Es común pre tratamientos para remover otros constituyentes mediante enzimas, oxidantes, y sustancias alcalinas disminuyendo el consumo energético.

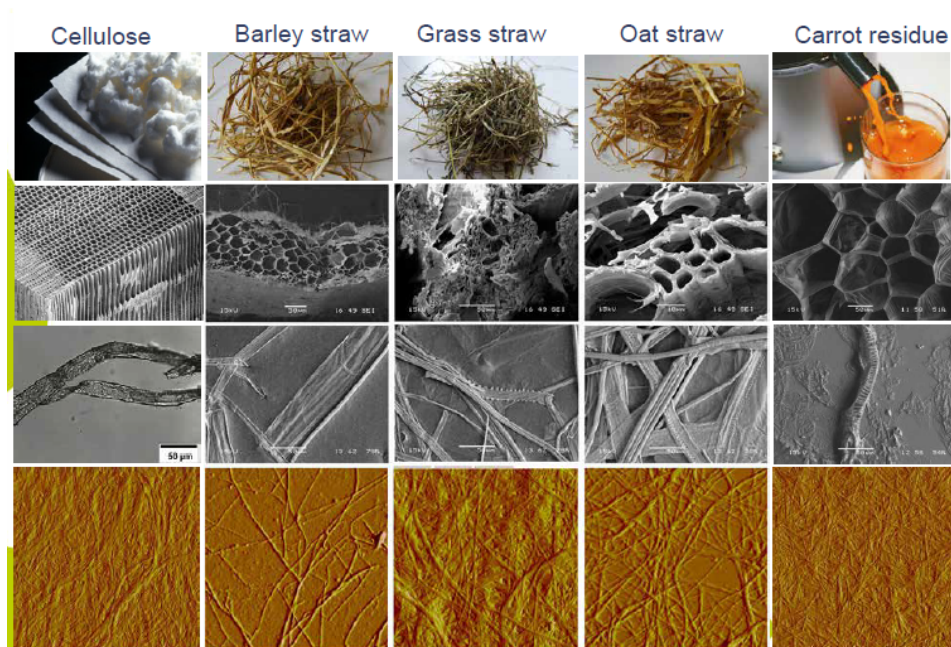


Figura 12. Nanofibras de celulosa a partir de diferentes fuentes (Oksman K., 2012)





El otro tipo es el de Whiskers de celulosa o celulosa nanocristalina (NCC) 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.

Un procedimiento típico aplicado para la producción de NCC 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 A., 2013).

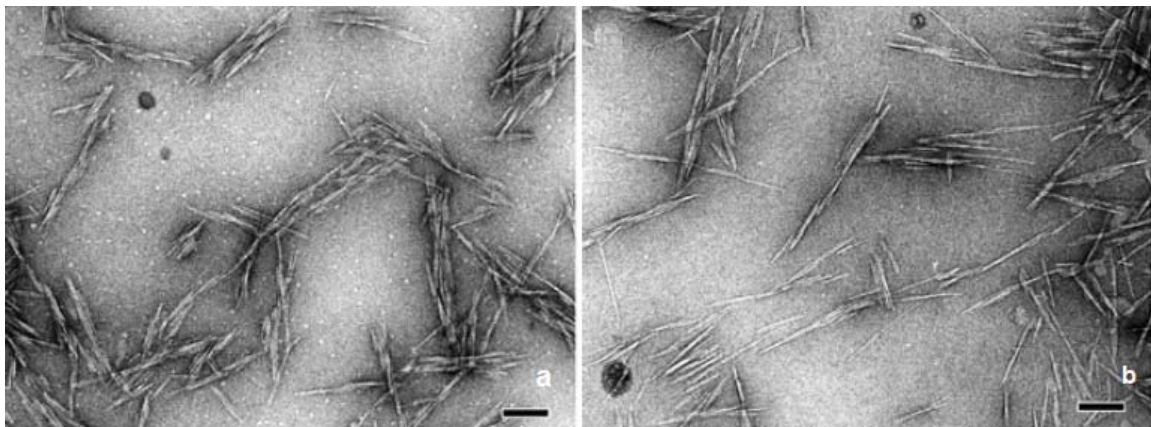


Figura 13. Fotografías de Celulosa Nanocristalina obtenida por hidrólisis con ácido sulfúrico a partir de: a. Eucalipto; b. Bambú. Las barras de escala corresponden a 100nm. (Brito B., Pereira F., Putaux J. y B. Jean, 2012)



### 1.4.3 HIDRÓLISIS DE LA CELULOSA

Las regiones amorfas en las cadenas de celulosa son más susceptibles a la hidrólisis ácida, de manera que en estas secciones se facilita la ruptura de los enlaces glucosídicos, liberando los cristales individuales. Ácidos como el Sulfúrico y Clorhídrico son utilizados frecuentemente para la preparación de NCC, pero también se ha empleado ácido Fosfórico y Bromhídrico para este propósito.

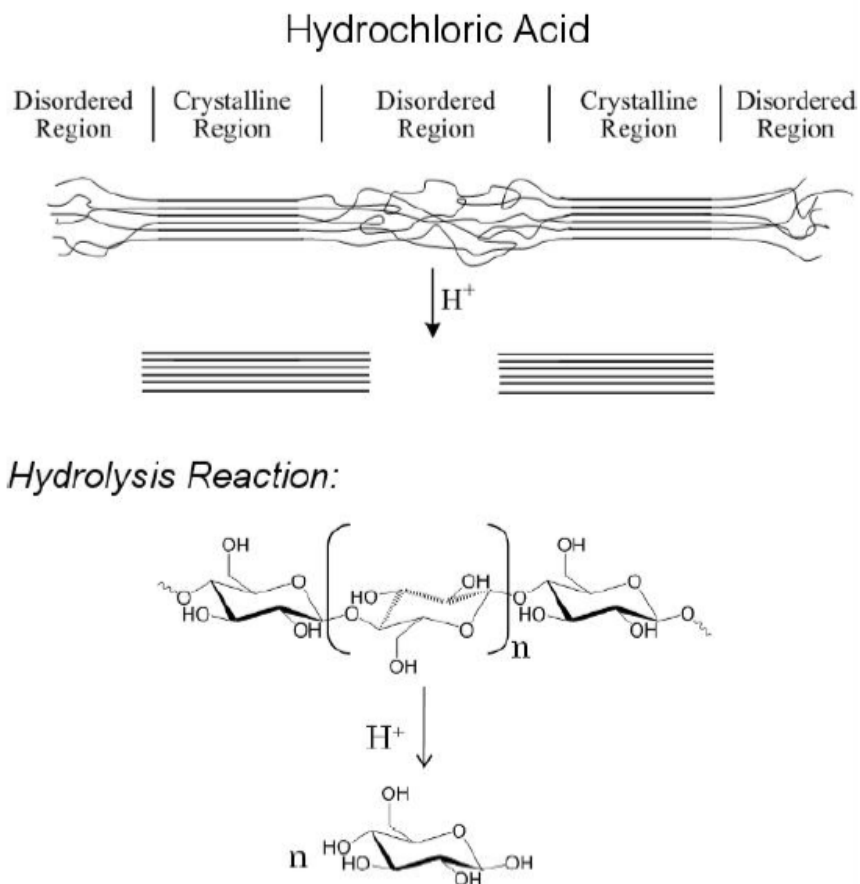


Figura 14. Hidrólisis ácida de la celulosa para producir NCC. (Ureña E., 2011)

Se ha observado que las suspensiones coloidales producidas por hidrólisis con ácido Sulfúrico son más estables. Esto se puede explicar por el hecho de que los whiskers de celulosa tratados tienen una importante densidad de carga en su superficie, como consecuencia de la inserción de los grupos sulfato en la



superficie de los whiskers que inducen una carga electrostática negativa haciendo que se genere una repulsión entre partículas de manera que la suspensión ni precipita ni flocula.

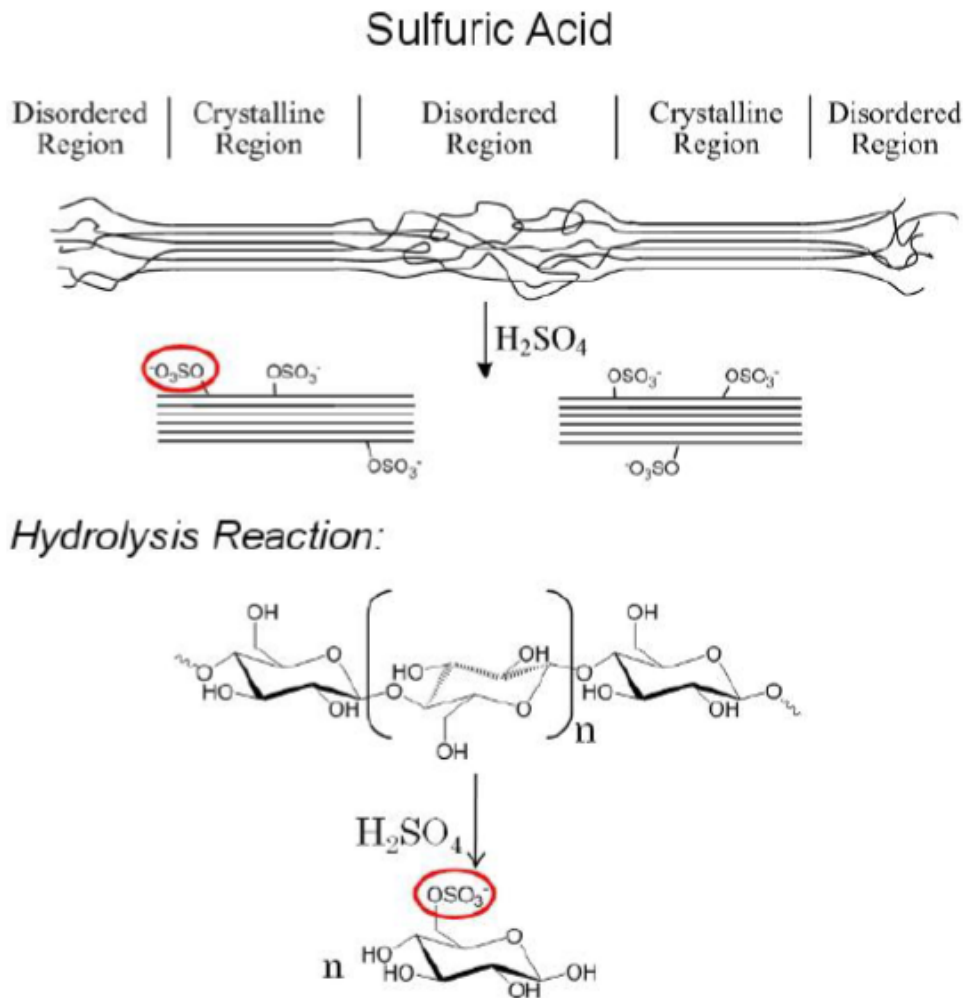


Figura 15. Representación esquemática del aislamiento de NCC. (Ureña E., 2011)



Fuente de Celulosa	Largo (nm)	Ancho (nm)	Técnica
Bacteria	100-1000	10-50	TEM
Algodón	100-150	5-10	TEM
Algodón	150-210	5-11	AFM
MCC	35-265	3-48	TEM
Ramio	150-250	6-8	TEM
Sisal	100-500	3-5	TEM
Maderas suaves	100-150	4-5	AFM
Maderas duras	140-150	4-5	AFM
Tunicados	1000-3000	15-30	TEM
Tunicados		8,8x18,2	SANS
Valonia ventricosa	≥100	14-18	TEM

Tabla 6. Tamaño de NCC aislado de diferentes fuentes de Celulosa. (Habibi et al., 2010; citado en Ureña E., 2011)

El tamaño de NCC depende de su fuente como se observa en la Tabla 7. Las condiciones de hidrólisis también afectan el tamaño y la distribución de las partículas de manera que a mayor tiempo de hidrólisis y temperatura se obtienen menores tamaños, pero si las condiciones son muy severas los dominios cristalinos pueden ser completamente hidrolizados.

Fuente de Celulosa	% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , conc	Tiempo, min	T, °C	Ácido/celulosa ml/g	Tamaño, nm
Pulpa de madera suave	64	10	70	8,75	~ 200 x 5
	60	50	<70	8,75	~ 200 x 5
	65	10	70	10	185 ± 75 x ~3,5
	65	60	45	8,75	185 ± 75 x ~3,5
	64	45	45	17,5	100-250 x 5-15
Pulpa de madera dura	64	25	45	8,75	147±7 x 3-5
	64	25	45	8,75	141±6 x 5±0,3
	64	45	45	8,75	120±5 x 4,9±0,3
	64	45	45	17,5	105±4 x 4,5±0,3
Algodón	64	120	45	8,75	~ 200 x 5
	64	60	45	8,75	115±10 x ~7
	64	45	45	17,5	176±21 x 13±3
	64	120	60	8,33	70-150 x 10-20
	65	60	45	8,75	100-150 x 5-10
Sisal	65	15	60	16,2	~ 250 x 4
Lino	64	240	45	8,33	327±108 x 21±7
Paja de trigo	65	60	25	34,3	150-300 x ~5
MCC	63,5	130,3	44	10	200-400 x <10
	64	300	45	8,75	41-320 x <100
	64	180	45	17,5	60-120 x 8-10
	64	-	45	8,75	100-225 x 10-15

Tabla 7. Whiskers de celulosa preparados en diferentes condiciones. (IPST, 2013)



#### 1.4.4 PROPIEDADES

Debido a su arreglo cristalino casi perfecto, se ha estimado que su rigidez es de aproximadamente 140-220 GPa similar al de las fibras de aramida (Kevlar). Para whiskers extraídos de tunicados se encontró el valor de 143 GPa empleando espectroscopia de Raman para su análisis. Su resistencia a la tracción es de aproximadamente 500 MPa. Además se estimó que el área superficial específica (specific surface area) se encontraba en un rango de 150 a 170 m<sup>2</sup>/g.

Las películas hechas a partir nanocelulosa tienen alta resistencia (más de 200 MPa), alta rigidez (en torno a 20 GPa). Su relación resistencia / peso es 8 veces superior al acero inoxidable. (Fergusson W., 2012)

Las partículas de celulosa nanométrica obtenidas por hidrólisis con ácido sulfúrico se encuentran orientadas al azar cuando están diluidas, pero a medida que incrementa su concentración adoptan configuraciones en las que se alinean minimizando las interacciones electrostáticas, llegando a producir birrefringencia en suspensiones por encima de una concentración crítica. Esta auto organización se observa mediante microscopía de luz polarizada en la que se revela patrones similares a huellas dactilares indicativas de un orden quiral nemático. Además esta estructura puede mantenerse después de evaporación completa del agua produciendo filmes iridiscentes. Esta propiedad podría aplicarse para crear materiales de revestimiento, decorativos, y papeles de seguridad. (Habibi et al., 2010)

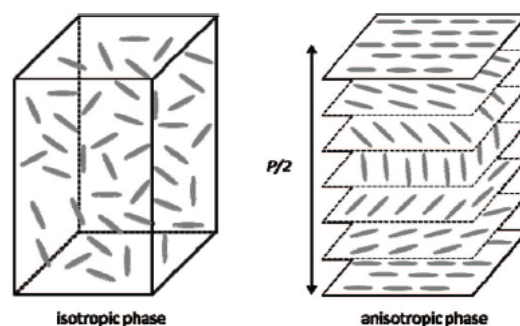


Figura 16. Representación esquemática de la orientación de NCC en su fase isotrópica y anisotrópica. (Habibi et al., 2010)



#### 1.4.5 CARACTERIZACIÓN

La combinación de técnicas de microscopía con el análisis de imágenes puede proveer información acerca del ancho de las fibras de nanocelulosa, pero es más difícil determinar su longitud debido a la agregación y consecuente dificultad de identificar los extremos de una fibrilla individual (Habibi et al., 2010). Las técnicas más comunes son microscopía de fuerza atómica (AFM), microscopía electrónica de transmisión (TEM), microscopía electrónica de barrido (SEM) o técnicas de dispersión como dispersión de neutrones de ángulo pequeño (SANS) (Ureña E., 2011).

#### 1.4.6 APLICACIONES

Según el Instituto nacional de Iniciativa en Nanotecnología de los Estados Unidos se estima que la Nanocelulosa tendrá un mercado de 200 billones de dólares para 2020 en todo el mundo y que además generará alrededor de 2 millones de empleos. (TAPPI, 2011)

##### 1.4.6.1 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. (Capadona et al, 2007; citado en Pillai K; 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. (Lin et al, 2009; Bondeson et al, 2007; Anglés et al, 2001; citados en Pillai K; 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. 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. (Pan J., et al., 2010; Kimura et al., 2005; citados en Ureña E., 2011)

#### 1.4.6.2 PAPEL

Henriksson, Isaksson y Lars prepararon un papel a partir de una suspensión de nanofibras de celulosa y encontraron que poseía un módulo de Young de 13.2 GPa y un valor de tensión de rotura de 214 MPa, valores extraordinariamente altos.



#### 1.4.6.3 PRODUCTOS EN EL MERCADO

Existen ya productos en el mercado que involucran nanocelulosa, un ejemplo es el filtro de aire para vehículos fabricado por la empresa AMSOIL INC. Que garantiza 4 años o 160000 km de servicio. Explican que su producto es capaz de filtrar con una eficacia 5 veces superior a un filtro de celulosa común, con un flujo de aire 3 veces superior y 15 veces más retención de polvo. Así reduce el costo de mantenimiento por cuatro años de 190 \$ a 38 \$ (Ultimate Synthetic Oil, 2014)



Figura 17. Filtro para vehículos AMSOIL (Ultimate Synthetic Oil, 2014)





## CAPÍTULO II

### 2. METODOLOGÍA

#### 2.1 RECOLECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras fueron recolectadas en la “Hacienda Nueva”, propiedad del Ing. Carlos Aniad, ubicada a 500m de la “Y” del Cambio en la carretera Pasaje – Machala.



Figura 18. Ubicación de la Hacienda Nueva. (Google Maps - ©2014 Google)

Las muestras obtenidas pertenecen a la variedad de Banano Grand Cavendish, con un estado de maduración de 12 semanas.

Para tomar y preparar las muestras se utilizó como guía la norma TAPPI T257 (Ver en Anexos) “Muestreo y preparación de madera para análisis”.



Figura 19. Preparación de las muestras para análisis. a. Tallo Floral; b. Corte en el tallo floral; c. Reducción de tamaño en un molino manual; d. Envase que contiene secciones de tallo floral.



Figura 20. Preparación de pseudotallo para análisis. a. Sección de pseudotallo; b. Reducción de tamaño previo a la molienda; c. Corte en estructura interna de pseudotallo; d. Tallo floral y pseudotallo listos para el análisis.

## 2.2 ANÁLISIS QUÍMICO DE PSEUDOTALLO Y TALLO FLORAL

Para realizar el análisis químico se empleó normas provistas por la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, TAPPI; Ver en Anexos).



ANALISIS	TAPPI	TITULO
Cenizas	T-211	<i>Ash in wood, pulp and paperboard: combustion at 525°C</i>
Humedad	T-264	<i>Preparation of wood for chemical analysis</i>
Solubilidad en benceno - etanol	T-204	<i>Solvent Extractives of wood and pulp</i>
Contenido de hemicelulosa	T-212	<i>One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp</i>
Contenido de lignina	T-222	<i>Acid-insoluble lignin in wood and pulp</i>

Tabla 8. Lista de normas TAPPI para análisis de constituyentes de tallo floral y pseudotallo.

En la determinación de extractos solubles en solventes (TAPPI T204) se empleó acetona en lugar de la mezcla benceno – etanol, debido a que la norma nos deja abierta esta posibilidad.

Para la determinación del contenido de celulosa en primera instancia se consideró la norma TAPPI T203, pero debido a la imposibilidad de disponer el volumen necesario de ácido sulfúrico requerido se optó por utilizar el método Kürshner-Höffer que emplea una mezcla de ácido nítrico y etanol (Pettersen, 1984).

Cada uno de estos análisis fue realizado en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad.



Figura 21. Laboratorio de Bromatología. Universidad de Cuenca.



Figura 22. Determinación de humedad. a. Muestras a pesar. b. Secado en mufla. c. Pseudotallo libre de humedad. d. Tallo floral libre de humedad.



Figura 23. Determinación de cenizas. a. Introduciendo las muestras a la mufla a 525°C. b. Muestra reducida a cenizas.



Figura 24. Determinación de elementos solubles en benceno etanol.

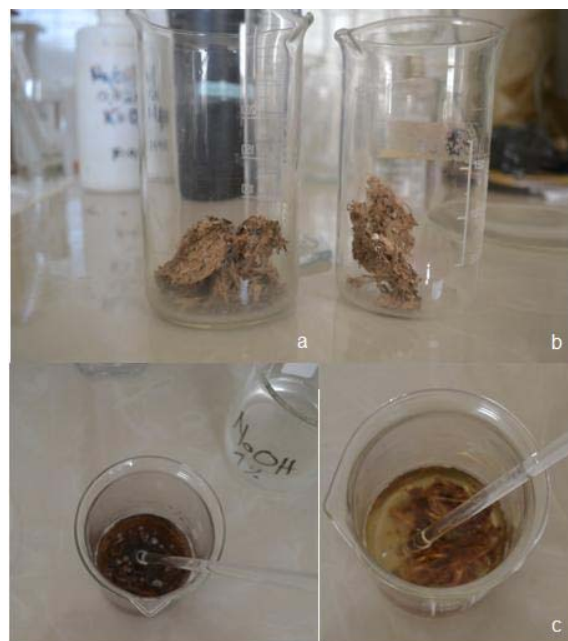


Figura 25. Determinación de hemicelulosa. a. Muestra de tallo floral. b. Muestra de Pseudotallo. c. Tratamiento con NaOH 1%.



Figura 26. Imagen izquierda corresponde a tallo floral al final del tratamiento con NaOH al 1%. Imagen de la derecha corresponde al pseudotallo en la misma instancia.



Figura 27. Determinación de lignina. Izquierda pseudotallo. Derecha: tallo floral.



Figura 28. Determinación de celulosa. a. Muestras de pseudotallo y tallo floral. b. Inicio de la extracción con  $\text{HNO}_3$  y etanol



Figura 29. Etapa final extracción de celulosa a. Pseudotallo. b. Tallo floral. c. Tratamiento con 25 ml de KOH al 1% antes de filtrar.





### 2.3 OBTENCIÓN DE CELULOSA

El procedimiento empleado fue desarrollado por Ureña E., con ligeras modificaciones considerando trabajos realizados por otros investigadores, enfocándose en el rendimiento obtenido por cada uno de ellos en diferentes etapas del proceso.

#### 2.3.1 PRE TRATAMIENTO PARA RESIDUOS DE BANANO

Se redujo el tallo floral y pseudotallo a secciones de 30cm, se lavó con agua y se cortó las fibras a 2cm de largo. Finalmente se secó a 105°C por 14h.

#### 2.3.2 PREPARACIÓN DE LA PULPA DE CELULOSA



Figura 30. Fibras secas de pseudotallo y tallo floral juntas.

Se realizó un tratamiento alcalino con NaOH al 15% p/v, por 100 minutos de cocción bajo agitación continua. De esta manera se remueve la lignina por reacciones de hidrólisis que permiten su solubilización, liberando las fibras de celulosa. Aunque se suele emplear junto a la sosa, sulfuro de sodio en una mezcla que se denomina licor blanco, en este trabajo no se consideró el uso de sulfuro de sodio debido a que se ha observado en la industria papelera la emisión de gases sulfurados, tales como ácido sulfhídrico, metil mercaptano, sulfuro de di metilo y di sulfuro de di metilo (Biermann, 1996). Se repitió este procedimiento 3 veces.



Figura 31. Extracción de celulosa de los residuos de banano.

Se lavó con agua destilada y filtró hasta alcanzar pH neutro. Se obtiene 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. En la industria papelera a este líquido residual se lo utiliza como combustible en las calderas, obteniendo licor verde de donde se recupera en etapas posteriores licor blanco por medio de cal.

Se removió la lignina residual. A este tratamiento se denomina Blanqueo y se utilizó 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.

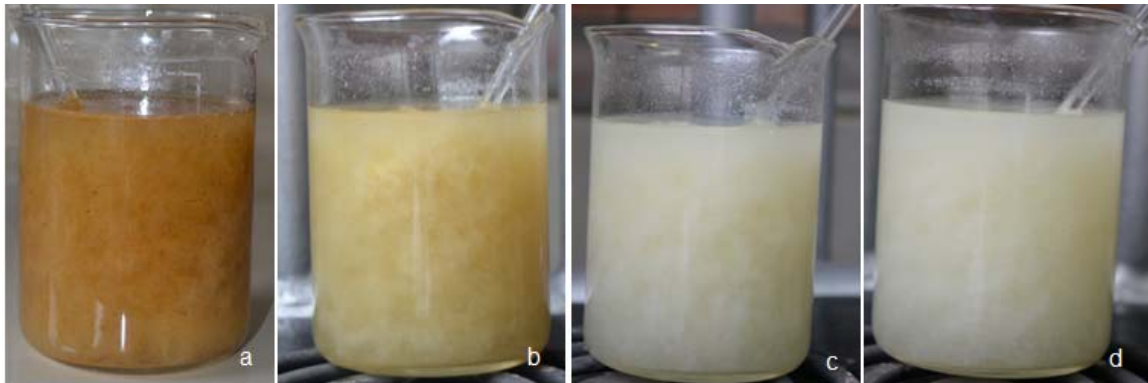


Figura 32. Proceso de blanqueamiento de la celulosa. a. Al inicio. b. 15 min. c. 30 min. d. 60 min.



Figura 33. Lignina removida y celulosa blanqueada.

#### 2.4 OBTENCIÓN DE NANOCELULOSA

Se tomó 10 g de celulosa para hidrolizarlos con 83 ml de  $H_2SO_4$  al 61% p/v por 90 min y a 45 °C. La suspensión coloidal lechosa obtenida fue lavada con agua destilada usando ciclos repetidos de centrifugación de 10 a 3500 rpm, hasta alcanzar un pH de entre 3 y 5.



Figura 34. Obtención de nanocelulosa.



Figura 35. Suspensión coloidal lechosa de nanocelulosa.

## 2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA

Con la finalidad de conocer la forma y tamaño de las partículas que contiene la suspensión coloidal obtenida se recurrió al laboratorio de microscopía electrónica de la Escuela Superior Politécnica del Ejército, para obtener imágenes mediante un microscopio electrónico de transmisión (TEM).

### PREPARACIÓN DE MESH (REJILLAS DE COBRE/ GRIDS):

Se utilizó mesh de 300 y se los cubrió con una fina capa de *formvar resin*, seguido por una capa de carbono.



Figura 36. Superior: cuarto de preparación de muestras. Inferior: Preparación de la muestra a observar en el TEM.



## PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

### Primera Observación:

Se tomó la parte más líquida de la muestra de nanocelulosa evitando tomar la parte espesa, se diluyó la alícuota en agua destilada en una relación 1:2. Se hizo caer tres gotas de la solución sobre el mesh. Con papel filtro se secó el exceso de muestra sobre el mesh. Se observó la muestra en el microscopio electrónico de transmisión TECNAI SPIRIT a 80 kV

Debido a que no se pudo observar ninguna imagen con las primeras muestras fue necesario utilizar una sustancia de tinción.

### Segunda Observación:

Se tomó la parte más líquida de la muestra de nanocelulosa evitando tomar la parte espesa, se diluyó la alícuota en agua destilada en una relación 1:2. Se hizo caer tres gotas de la solución sobre el mesh. Con papel filtro se secó el exceso de muestra sobre el mesh. Se hizo gotear una gota de ácido fosfotúngstico (PTA por sus siglas en inglés). Se dejó la gota por 5 segundos y se secó el exceso con papel filtro. Se observó la muestra en el microscopio electrónico de transmisión TECNAI SPIRIT a 80 kV.



Figura 37. Superior: preparación del TEM para observar la muestra. Inferior: búsqueda de nanocelulosa.

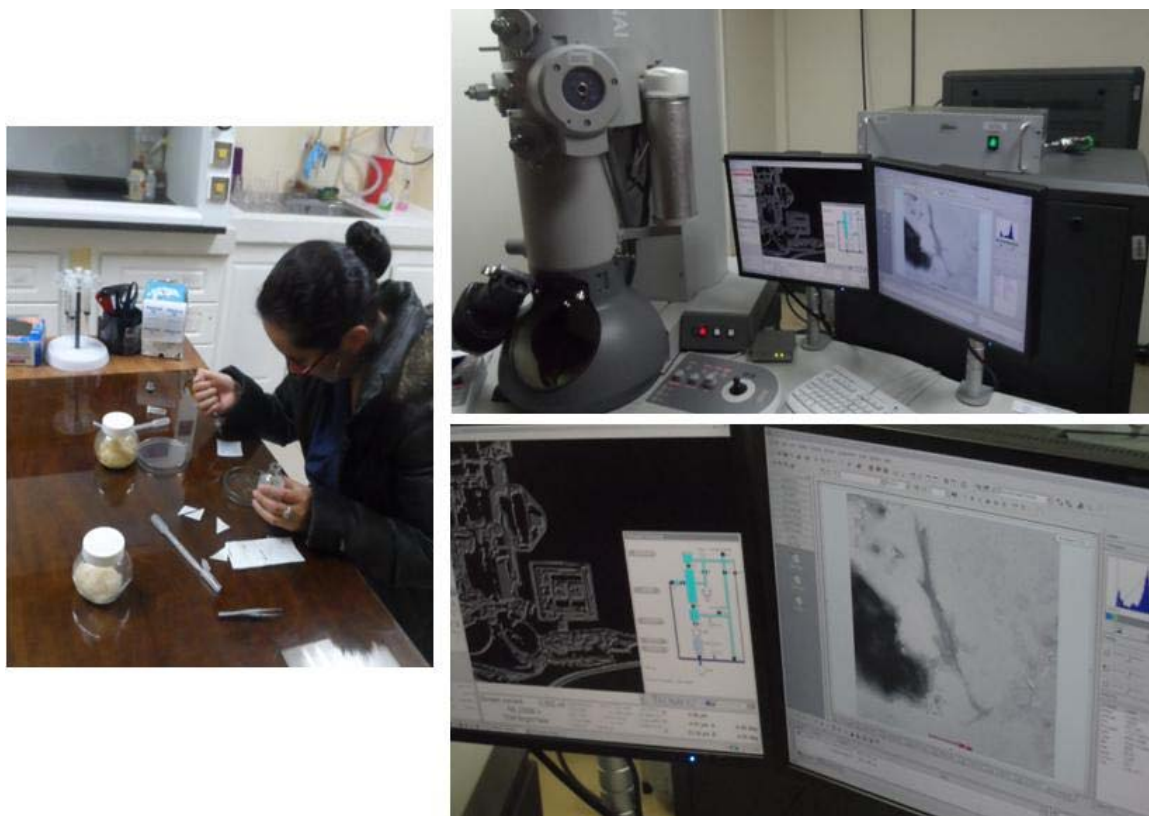


Figura 38. Izquierda: preparación de la muestra con tinción. Derecha: observación de nanopartículas de celulosa.

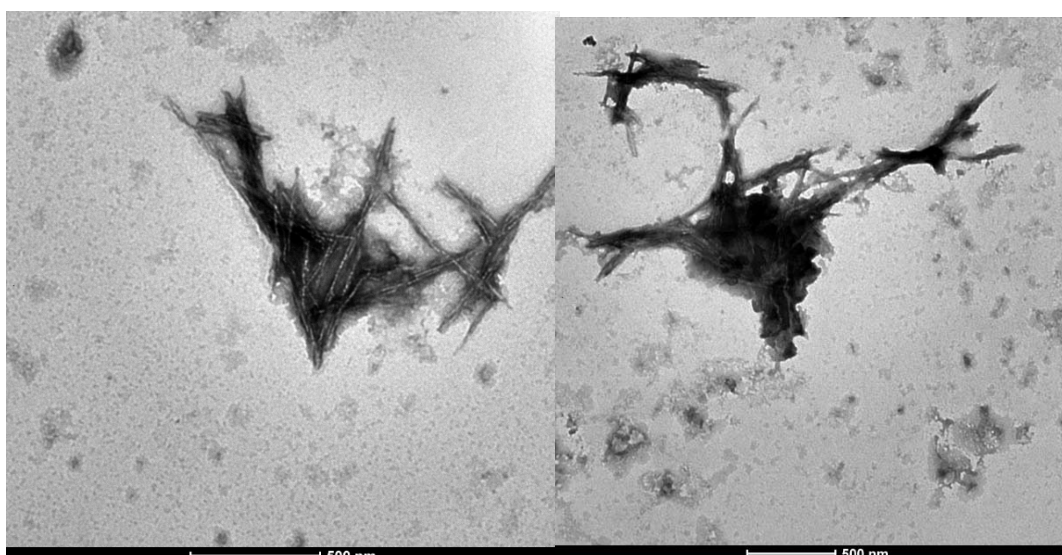


Figura 39. Fotografías de nanocristales de celulosa obtenidas con el TEM





Figura 40. Fotografía en la que se observa la rotura de la película de soporte.



### CAPÍTULO III

#### 3. RESULTADOS

##### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE PSEUDOTALLO Y TALLO FLORAL DE BANANO

Con los valores obtenidos de cada uno de los procedimientos descritos en las normas se pudo calcular la cantidad que corresponde a los constituyentes principales de los residuos agrícolas de banano. Los resultados se resumen en la Tabla 9.

<b>Residuo</b>	<b>Celulosa, %</b>	<b>Hemicelulosa, %</b>	<b>Lignina, %</b>	<b>Extraíbles, %</b>	<b>Cenizas, %</b>
<b>Pseudotallo</b>	37,85	26,67	19,45	1,69	8,65
<b>Tallo Floral</b>	26,86	34,04	18,69	2,78	18,78

Tabla 9. Composición de los residuos de banano.

<b>Residuo</b>	<b>Agua, g</b>	<b>Celulosa , g</b>	<b>Hemicelulosa , g</b>	<b>Lignina , g</b>	<b>Extraíbles , g</b>	<b>Cenizas , g</b>
Pseudotallo	867	50,34	35,47	25,87	2,25	11,5
Tallo Floral	922	20,95	26,55	14,58	2,17	14,65

Tabla 10. Cantidad de constituyentes de los residuos considerando 1000 g.

A partir de estos datos en combinación de los datos propuestos por Laprade (citado por Steiner R., 2006) y los datos de SINAGAP se estimó la cantidad de pseudotallo y tallo floral generados en el cultivo de banano en los últimos años en nuestro país. Se asume que todos los cultivos pertenecen a la variedad de banano estudiada. De la misma manera se estimó los valores de celulosa producida en dichos residuos.



Año	Producción, Kg	Raquis kg	Pseudotallo kg	Celulosa Pseudotallo	Celulosa Ra	Tot Celulosa	Cel/Banano	Rendimiento Banano kg/ha	Cel/ha
2000	5512204000	907071544,3	33491872405	1685980857	19003875	1704984731	0,3093109	21820	6749,164
2001	5611896000	923476557	34097595949	1716472980	19347573	1735820553	0,3093109	22970	7104,871
2002	5611438000	923401189,9	34094813165	1716332895	19345994	1735678888	0,3093109	24440	7559,558
2003	6453806000	1062018709	39212998481	1973982344	22250142	1996232485	0,3093109	27600	8536,981
2004	6132276000	1009108709	37259398481	1875638120	21141635	1896779754	0,3093109	270700	83730,46
2005	6118425000	1006829430	37175240506	1871401607	21093882	1892495489	0,3093109	276700	85586,32
2006	6127060000	1008250380	37227706329	1874042737	21123652	1895166389	0,3093109	292700	90535,3
2007	6002302000	987720582,3	36469683038	1835883844	20693536	1856577381	0,3093109	304100	94061,44
2008	6701146000	1102720228	40715823797	2049634570	23102871	2072737441	0,3093109	310900	96164,76
2009	7637324000	1256774835	46403993924	2335977054	26330438	2362307492	0,3093109	353400	109310,5
2010	7931060000	1305111139	48188718987	2425820114	27343122	2453163236	0,3093109	367800	113764,5
2011	7427776000	1222292253	45130790886	2271884013	25608001	2297492014	0,3093109	386900	119672,4
2012	7012244000	1153913570	42606039494	2144788028	24175412	2168963441	0,3093109	332500	102845,9

Tabla 11. Estimación de la cantidad de celulosa que se pudo aprovechar en los últimos años en nuestro país.

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA NANOCELULOSA

Los valores de ancho y largo fueron determinados a partir de las imágenes obtenidas con el TEM por medio del software Image J.

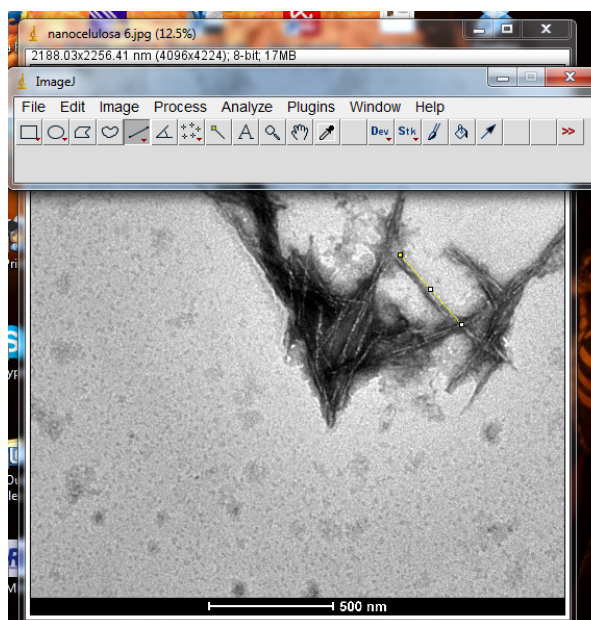


Figura 41. Image J software.



Results						
File	Edit	Font	Results			
	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	145.817	122.253	55.607	199.976	-41.186	272.568
2	170.929	74.035	22.422	148.253	-155.493	319.371
3	146.959	46.058	19.544	95.890	-110.973	274.604
4	137.827	175.642	62.190	229.641	-125.538	257.335
5	137.827	85.645	26	196.519	-94.764	257.299
6	148.386	57.071	2.781	122.110	-123.690	277.350
7	128.981	101.770	57.636	142.901	-127.073	241.027
8	130.693	56.781	1.349	157.767	-57.144	244.189
9	171.785	76.813	27.430	157.422	25.201	321.167
10	133.262	70.274	18.374	123.879	-105.945	248.893
11	189.762	46.845	0	151	121.201	354.727
12	139.825	78.084	4.168	154.182	-92.816	260.999
13	191.189	46.936	0	110.281	-165.466	357.598
14	136.686	73.240	8.840	164.280	-110.556	255.590
15	189.192	84.710	13.255	163.352	-132.553	353.876

Results						
File	Edit	Font	Results			
	Area	Mean	Min	Max	Angle	Length
1	7.990	104.914	36.457	151	-26.565	14.334
2	15.409	81.378	49.584	116.007	-8.746	28.105
3	8.846	46.196	11.667	91	-66.801	16.273
4	7.990	93.473	61.173	132	-63.435	14.334
5	12.556	67.473	37.132	89.726	-48.814	22.714
6	6.849	95.993	22	157.359	-30.964	12.459
7	11.985	75.600	41	102.554	-11.310	21.791
8	5.707	115.600	46	160	0	10.684
9	10.844	69.703	35	120.394	-12.529	19.700
10	11.700	85.998	27.600	158	5.711	21.474
11	8.561	75.233	58.430	88.927	56.310	15.408
12	11.985	129.727	95.352	165.149	29.055	21.999
13	7.990	86.143	57	114	-90	14.957
14	7.419	95.159	66.600	118.338	-71.565	13.514
15	10.558	96.216	70.556	118.556	-96.340	19.349
16	9.417	79.195	50.500	111	-60.255	17.227
17	5.707	79.700	54	110	0	10.684
18	5.422	85.519	60	100.642	-26.565	9.556
19	10.558	73.096	51.432	102.111	-26.565	19.112
20	3.995	151.166	101	191.331	18.435	6.757

Tabla 12. Izquierda: Medición de longitud. Derecha: Medición de ancho.

La longitud promedio de celulosa es de 286,44 nm, mientras que su ancho promedio es 17,73 nm. Su consecuente relación longitud/diámetro es de 16,16.



#### 4. CONCLUSIONES

Se pudo encontrar que el peso en base seca de celulosa en el pseudotallo corresponde a 37,85 % y 26,86 % en el tallo floral por lo que se puede decir que su contenido de celulosa es importante al momento de considerarlo para producir nanocelulosa.

Sin embargo el contenido de agua podría ser un limitante para el transporte de estos residuos hacia una unidad de producción fuera del lugar de cultivo. Por lo que un procedimiento para eliminar el agua sería dejar que se seque a la intemperie previamente al traslado hacia la planta procesadora de celulosa, pero la acción de microorganismos disminuiría su rendimiento.

Por medio de las fotografías de TEM se pudo comprobar que el tratamiento aplicado es adecuado para producir nanocelulosa, sin embargo sería necesario estandarizar el proceso. Es importante mencionar que al momento de preparar las muestras para analizar en el microscopio electrónico se tuvo la dificultad de no tener experiencia en la búsqueda de las nanopartículas por lo que estandarizar un procedimiento de observación así como de preparación de muestras también es necesario.

Finalmente la nanocelulosa obtenida corresponde a celulosa nanocristalina porque su forma y dimensiones corresponden a lo citado en la literatura, estableciendo con esta Tesis las bases necesarias para explorar aplicaciones en nuestro país como las ya descritas, o bien crear innovaciones propias.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- AEBE, (2010) *La industria bananera Ecuatoriana año 2010*. Ni. Asociación de Exportadores de Banano del Ecuador. Disponible en: [http://www.aebe.com.ec/data/files/noticias/Noticias2012/AEBE/INDUSTRIA\\_BANANERA\\_2011\\_3\\_%20jul18.pdf](http://www.aebe.com.ec/data/files/noticias/Noticias2012/AEBE/INDUSTRIA_BANANERA_2011_3_%20jul18.pdf) Fecha de acceso: 20 de junio de 2011.
- Aguilar S.; Ramírez J. y O. Malagón, (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(2), Marzo de 2007, pp. 89 – 98.
- Bhattacharya D, Germinario LT, Winter WT. (2008) “Isolation, preparation and characterization of cellulose microfibrils obtained from bagasse” en: *Carbohydrate Polymers* 2008; 73(3), pp. 371-377.
- Bolio G.; Valadez A.; Veleza L. y A. Andreeva, (2011) “Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano: obtención y caracterización” en *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Vol. 10, No.2 (2011), pp. 291 – 299.
- Boyle C., (2009) El siglo de la fraternidad 2 - Parte II. Disponible en: <http://carlosboyle.blogspot.com/2009/04/el-siglo-de-la-fraternidad-2-parte-ii.html> Fecha de acceso: 10 de diciembre de 2013.
- Brito B., Pereira F., Putaux J. y B. Jean, (2012) “Preparation, morphology and structure of cellulose nanocrystals from bamboo fibers” en *Cellulose* 19. Springer Journal (2012), pp. 1527–1536.
- Cabanilla P. y L. Intriago (2009) *Comercialización de papel ecológico a base de fibra de banano, en la ciudad de Guayaquil*. Tesis de Grado en Ingeniería Comercial, Facultad de Ciencias Administrativas, Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.
- Camargo N. y D. Williams, (2012) “Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Menta” en *Tecnura* Vol. 16 No. 34 octubre – diciembre 2012, pp. 142 – 156.



- Carvajal E.; Guamán C.; Portero P.; Salas E.; Tufiño C. y B. Bastidas, (2013) "Second Generation Ethanol from residual Biomass: Research and perspectives in Ecuador" en InTech pp. 265 – 284 Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/second-generation-ethanol-from-residual-biomass-research-and-perspectives-in-ecuador> Fecha de acceso: 29 de octubre de 2013
- Ek M.; Gellerstedt G. y G. Henriksson (eds.) (2009) *Pulp and Paper Chemistry and Technology*. Vol I. Stockholm, De Gruyter.
- FECYT: Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, (2009) *Nanociencia y Nanotecnología*. Disponible en: <http://www.fecyt.es/fecyt/detalle.do?elegidaSiguiente=&elegidaNivel3=&elegidaNivel2=;Publicaciones;divulgacioncientifica&elegidaNivel1=;Publicaciones&tc=publicaciones&id=UD%20Nano> [Fecha de acceso: 2 de marzo de 2012]
- Fergusson W., (2012) *Why wood pulp is world's new wonder material*. Disponible en: <http://www.newscientist.com/article/mg21528786.100-why-wood-pulp-is-worlds-new-wonder-material.html> Fecha de acceso: 5 de enero de 2013.
- Ferrer A., (2013) *Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma (EFB). Obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar*. Tesis de Doctorado. Córdoba, Departamento de Química Inorgánica e Ingeniería Química, Universidad de Córdoba.
- Grandar D.; Mejía A. y Jiménez G., (2005) "Utilización de residuos de plátano para la producción de metabolitos secundarios por fermentación en estado sólido con el hongo *Lentinus crinitus*" en *VITAE*, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica Universidad de Antioquia, Medellín – Colombia. Volumen 12 número 2, año 2005, pp. 13 – 20
- Guarnizo A. y P. Nel Martínez, (2011) "Estudio de la hidrólisis ácida del raquis de banano" en *Rev. Invest. Univ. Quindío* (22), pp. 83 – 91.



- Hon D. y N. Shiraishi (eds.) (2001) *Wood and Cellulosic Chemistry*. Second Ed. New York, Marcel Dekker Inc.
- Habibi Y., Lucia L., y O. Rojas, (2010) “Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications” en *Che Rev. American Chemical Society* (110), pp. 3479 – 3500. Disponible en: <http://www.ncsu.edu/biosucceed/documents/FINAL.pdf> Fecha de acceso: 5 de enero de 2013.
- Henriksson M., Lars A., y I. Per, (2008) “Cellulose Nanopaper Structure of High Toughness” *Biomacromolecules* 2008, 9, pp. 1579–1585.
- IPST, (2013) Institute of Paper Science and Technology. Georgia Tech. Disponible en: [http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas\\_art/technical\\_reviews/ncw.pdf](http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/ncw.pdf) Fecha de acceso: 2 de febrero de 2013.
- Jiménez J., (2006) *Determinación y aplicación de métodos estadísticos, para medir estabilidad genética en vegetales, caso: Banano*. Tesis de Grado en Ingeniería en Estadística Informática. Guayaquil, Instituto de Ciencias Matemáticas, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Kalia S.; Kaith B. S. y I. Kaur (eds.) (2011) *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites*. Springer.
- Khan M. et al. (2013) “Fiber morphology and pulping study of banana pseudo-stem” en *International Journal of Fiber and Textile Research* 2013; 3(1): pp. 31 – 35.
- Kumar M. y D. Kumar. (2011) “Comparative study of pulping of banana stem” en *International Journal of Fiber and Textile Research* 2011; 1(1), pp. 1 – 5.
- MAGAP, (2012) *Zonificación agroecológica del cultivo de banano (Musa Sapientum) en el Ecuador a escala 1:25.000 y 1:250.000*. Ni. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca – MAGAP. Disponible en: <http://servicios.agricultura.gob.ec/sinagap/index.php/memorias-tecnicas/file/2530-zonificacionagroecologica> Fecha de acceso: 31 de Octubre de 2013.





- Marsh J.T. y F.C. Wood (1942) *An Introduction to the Chemistry of Cellulose*. Second Ed. London, Chapman and Hall Ltd.
- Mazzeo M. et al. (2010) “Aprovechamiento Industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el departamento de Caldas” en *Revista Educación en Ingeniería*. N°. 9 - 2010, pp. 128 – 139.
- Mohapatra D.; Mishra S. y N. Sutar (2010) “Banana and it’s by – product utilization: an overview” en *Journal of Scientific & Industrial Research* Vol. 69, Mayo 2010, pp. 323 – 329.
- Molina J.; Paz Y.; Colina M. y D. Calderón. (2012) “Caracterización de celulosa obtenida del pseudotallo de plátano con fines industriales” en *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Volumen 12(6), diciembre de 2012, pp. 332 – 341.
- Mukhopadhyay et al, (2008) “Banana Fibers-Variability and Fracture Behavior” en *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. Volume 3, Issue 2—2008, pp. 39 – 45.
- Mäkinen T.; Alakangas E. y M. Kauppi (eds.) (2010) *BioRefine Yearbook 2010*. Helsinki, Tekes. Disponible en: [http://www.tekes.fi/Julkaisut/biorefine\\_yearbook\\_2010.pdf](http://www.tekes.fi/Julkaisut/biorefine_yearbook_2010.pdf) Accesado el: 13 de febrero de 2012.
- Noblecilla E., (2008) *Estudio y Análisis del banano y propuesta gastronómica en la provincia de El Oro*. Tesis de Licenciatura. Quito, Facultad de Turismo y Preservación Ambiental, Hotelería y Gastronomía, Universidad Técnica Equinoccial.
- Nour-Eddine El Mansouri J. (2001) *Técnicas de caracterización de lignina. Aplicación a ligninas técnicas de 5 orígenes distintos*. Departament d’Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili
- Oksman K., Aji M., (2012) *High technology nanomaterials from the forest resources*. Wood and Bionanocomposites & Composite Center Sweden, Luleå University of Technology
- Orellana H.; Solórzano H.; Bonilla A.; Salazar G.; Falconí – Borja C.; y R. Velasteguí, (2008) “El cultivo de banano” en *Vademécum Agrícola 2008*.



Edifarm. Disponible en:  
[http://www.edifarm.com.ec/edifarm\\_quickagro/pdfs/manual\\_cultivos/BANANO.pdf](http://www.edifarm.com.ec/edifarm_quickagro/pdfs/manual_cultivos/BANANO.pdf) Fecha de acceso: 31 de Octubre de 2013.

- Paredes D., (2010) *Obtención de enzimas celulasas a partir de hongos (Pleurotus ostreatus, Pleurotus pulmonarius y Lentinula edodes) utilizando como sustratos los residuos del cultivo del banano (Musa cavendish)*. Tesis de Grado en Ingeniería en Alimentos. Ambato, Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos, Universidad Técnica de Ambato.
- Pereira A.; M. do Nascimento; Cordeiro E.; Morais J.; Sousa M. y M. Rosa, (2010) "Characterization of lignocellulosic materials extracted from the banana pseudostem" en *7th International Symposium on Natural Polymers and Composites*, pp. 1077 – 1079.
- Pettersen R. (1984) "The chemical composition of wood". En Roger M. (ed.), *The chemistry of solid wood*. Washington, American Chemical Society.
- Pillai K., (2011) *Bio-inspired Cellulose Nanocomposites*. Tesis de Doctorado. Blacksburg, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and State University
- Restrepo A.; Zuluaga R.; Castro C.; Correa N.; Velez J. y P. Gañan, (2007) "Nano-composites reforzados con microfibrillas de celulosa aisladas de paredes celulares del raquis de banano" en *Scientia et Technica* Año XIII, No 36, Septiembre 2007. Universidad Tecnológica de Pereira, pp. 689 – 694.
- Rodríguez A., (2009) *Estudio de factibilidad para la producción y comercialización de banano (Musa sp.), variedad Gran enano Cavendish, en Quevedo, provincia de Los Ríos*. Tesis de Grado en Ingeniería en Agroempresas. Cumbaya, Colegio de Agricultura, Alimentos y Nutrición Departamento de Agroempresas, Universidad San Francisco de Quito.
- Rosal A.; Rodríguez A.; González Z.; y L. Jiménez. (2012) "Use of banana tree residues as pulp for paper and combustible" en *International Journal of Physical Sciences* Vol. 7(15), abril de 2012 pp. 2406 – 2413.



- SINAGAP (2013) Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca – SINAGAP [Página Web], por Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Disponible en: <http://servicios.agricultura.gob.ec/sinagap/index.php/superficie-produccion-y-rendimiento> Fecha de acceso: 16 de noviembre de 2013.
- Singh nee' Nigam P. y A. Pandey (eds.) (2009) *Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilization*. Springer.
- Steiner R. (2006) *Utilización energética de residuos orgánicos en el industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica*. Tesis de Postgrado en Ingeniería Ambiental. Fachhochschule Nordwestschweiz Hochschule für Life Sciences.
- Sugumaran P.; Priya V.; Ravichandran P.; y S. Seshadari. (2012) “Empty fruit bunch and delonix regia fruit pod” en *Journal of Sustainable Energy & Environment* 3 (2012) pp. 125-132.
- Ramsden J. (2009) *Essentials of Nanotechnology*. Disponible en: <http://bookboon.com/es/nano-technology-ebook> [Fecha de acceso: 29 de septiembre de 2012]
- TAPPI, (2011) *International Nanocellulose standards*, Nano conference workshop.
- Turrado J.; Saucedo A.; Sanjuan R. y B. Sulbaran. (2009) “Pinzote de Musa balbisiana y Musa acuminata como fuente de fibras para papel” en *Información Tecnológica* Vol. 20(4), pp.117 – 122 (2009)
- Ultimate synthetic oil, (2014) AMSOIL Announces Absolute Efficiency Ea Air Filters (EaA) with Nanofiber Technology for Automotive and Light Truck Applications. Disponible en: [http://www.ultimatesyntheticoil.com/Filters/Ea\\_Nanofiber\\_air\\_filters.htm](http://www.ultimatesyntheticoil.com/Filters/Ea_Nanofiber_air_filters.htm) Fecha de acceso: 2 de enero de 2014.
- Ureña E., (2011) *Cellulose nanocrystals properties and applications in renewable nanocomposites*. Tesis de Doctorado. Clemson, South Carolina. Clemson University.



- Williams L. y W. Adams, (2007) *Nanotechnology Demystified*. New York, McGraw Hill.
- Zugenmaier P. (2008) *Crystalline Cellulose and derivatives*. Berlin, Springer-Verlag.



ANEXO 1

T264	<b>Humedad</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Luna	37,7600	94,8206
		Peso Luna + Muestra	47,4480	107,9266
		Peso Muestra	9,6880	13,1060
		Libre de Humedad		
		Peso Luna + Muestra	38,5116	96,5380
		Peso Muestra	0,7516	1,7174
		%Humedad	92,2419	86,8961
T211	<b>Cenizas</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Muestra	0,5558	0,5621
		Peso Cápsula	67,5824	68,4642
		Luego de 525°C		
		Peso Cápsula + Muestra	67,6868	68,5128
		Peso Muestra	0,1044	0,0486
		%Cenizas	18,78374	8,64614837
T204	<b>Solubilidad en Acetona</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Muestra	2,0165	2,0714
		Peso Balón	100,1136	105,1805
		Luego de extracción		
		Peso de Balón + Residuo	100,1696	105,2155
		Peso Residuo	0,056	0,035
		%Extraibles	2,777	1,690
T212	<b>Hemicelulosa</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Muestra	2,1284	2,0510
		Luego de NaOH 1%		
		Peso Luna	95,6738	95,268
		Peso Muestra + Luna	97,0777	96,7721
		Peso Muestra	1,4039	1,5041
		%Solubilidad	34,03965	26,6650414
T222	<b>Lignina</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Muestra	1,0395	1,0955
		Luego de tratamiento ácido		
		Peso Luna	95,2844	63,1155
		Peso Muestra + Luna	95,4787	63,3286
		Peso Muestra	0,1943	0,2131
		%Lignina	18,69168	19,4523049
	<b>Celulosa Kürshner - Höffer</b>		<b>Pinzote</b>	<b>Pseudotallo</b>
		Peso Muestra	1,0419	1,0776
		Luego de tratamiento ácido + alcohol		
		Peso Luna	94,8282	95,2848
		Peso Muestra + Luna	95,1081	95,6927
		Peso Muestra	0,2799	0,4079
		%Celulosa	26,86438	37,8526355