

**BLANQUEO DE PULPAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA HOJA DE LA  
PALMA AFRICANA MEDIANTE REACCIÓN CON PERBORATO  
(PERÓXIDO DE HIDRÓGENO – BÓRAX)**

**LIZETH JULIANA GÓMEZ RUEDA  
DEYSI DANERY LEAL LEAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**

**BLANQUEO DE PULPAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA HOJA DE LA  
PALMA AFRICANA MEDIANTE REACCIÓN CON PERBORATO  
(PERÓXIDO DE HIDRÓGENO – BÓRAX)**

**LIZETH JULIANA GÓMEZ RUEDA  
DEYSI DANERY LEAL LEAL**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director**

**GUILLERMO GONZÁLES SIERRA  
Químico M.sc**

**Codirector**

**CRISÓSTOMO BARAJAS  
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2004**

A mis padres, que siempre me han dado su amor, su esfuerzo y apoyo.  
Y a todas las personas que han estado de alguna forma presente  
en este trabajo y colaboraron con su realización.

*Juliana*

A Dios por todo lo que me ha regalado,  
A mi mami, a quien le debo todo lo que soy  
porque este triunfo es de las dos,  
A mi hermano por su apoyo y compañía.  
Y a todas las personas y amigos que colaboraron  
para que este sueño se hiciera realidad.

Deysi

## RESÚMEN

**TÍTULO: BLANQUEO DE PULPAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA HOJA DE LA PALMA AFRICANA MEDIANTE REACCIÓN CON PERBORATO (PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y BÓRAX)**

**AUTORES:** Lizeth Juliana Gómez Rueda  
Deysi Danery Leal Leal\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Palma africana, Pulpas semiquímicas, Blanqueo, Peróxido de Hidrógeno, Bórax.

### DESCRIPCIÓN

Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación en Celulosa Pulpa y Papel (CICELPA) de la Universidad Industrial de Santander, tuvo como finalidad comparar las respuestas de blanqueo, evaluar las propiedades físico-mecánicas y ópticas de las pulpas obtenidas de la hoja de la palma africana.

Las hojas fueron suministradas por la empresa Palmas del Cesar y la pulpa fue obtenida mediante el proceso semiquímico a la soda fría con 15% de soda b.p.s (base pulpa seca).

El proceso de blanqueo se realizó en dos etapas: la primera con hipoclorito de sodio, y la segunda con peróxido de hidrógeno y bórax para obtener altos niveles de blancura y evitar el proceso de reversión de color o amarillamiento. Las condiciones para la primera etapa fueron: 50°C, tres horas de reacción, pH inicial 12 y 25% de hipoclorito de sodio b.p.s. Lográndose una blancura del 64.3% ISO. En la segunda etapa se trabajaron seis muestras, variando las relaciones de peróxido de hidrógeno y bórax entre 3.0 y 1.5% a 2 y 3 horas de reacción, las condiciones fueron: 70°C, pH inicial de 10,5 y presión atmosférica. La máxima blancura obtenida fue de 81.13% ISO que corresponde a la pulpa blanqueada con 3% de peróxido y 1.5% de bórax; y se obtuvo un rendimiento promedio de blanqueo del 72%.

Se evaluaron las resistencias físico-mecánicas, blancura e índice kappa, de acuerdo con las normas TAPPI; obteniéndose los mejores resultados para un "frenes" de 200. Se midió la reversión de color mediante un proceso de envejecimiento acelerado en una estufa a 80°C durante 72 horas, encontrándose que la pulpa con 3% de bórax y 3% de peróxido fue la más estable.

Los resultados presentan a la hoja de palma africana como un material con excelentes características para reemplazar a otros materiales celulósicos en la elaboración de papeles blanqueados.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de ciencias. Química, Msc. Guillermo González Sierra

## ABSTRACT

### **TITLE: THE BLEACHING OF PULPS OBTAINED FROM AFRICAN PALM SHEETS BY MEANS OF PERBORATE (HYDROGEN PEROXIDE AND BORAX) REACTION**

**AUTHORS:** Lizeth Juliana Gomez Rueda  
Deysi Danery Leal Leal

**KEY WORDS:** African palm, semichemical pulps, bleaching, hydrogen peroxide, borax.

#### DESCRIPTION

This study was carried out at the cellulose, pulp and paper, (CICELPA) Research Center, at the Universidad Industrial de Santander. The main purpose was to compare the bleaching responses of the soda pulps at some perborate applications and to evaluate optical and physical-mechanical properties of the pulps obtained from African palm leaves.

The African palms leaves were provided by the company Palmas del Cesar and the pulps were obtained by means of a cold soda semichemical process, with 15% of soda b.d.f (based on dry fibers).

The bleaching process was carried out in two stages: The first one with sodium hypochlorite, and the second one with hydrogen peroxide and borax in order to increase the brightness levels and to avoid the color reversion process or pulp yellowing. The conditions for the first stage were: 50°C, three hours reaction time, pH of 12 and 25% sodium hypochlorite achieving a brightness of 64,3% ISO. The second stage was applied to six semibleached samples, varying hydrogen peroxide and borax relations between 3,0 and 1.5% at 2 and 3 hours reaction time. The reactions conditions were: 70°C, initial pH 10.5 and atmospheric pressure. The maximum brightness obtained was 81.13% ISO which corresponds to the 3% peroxide and 1.5% borax bleached pulp. The average bleaching yield was 72%.

The physical mechanical resistances, brightness, and kappa index were evaluated according to TAPPI standards; obtaining best results at 200 cc CSF. The color reversion was measured by means of an accelerated aging process in a stove at 80°C during 72 hours, finding that 3% borax and 3% peroxide pulp was the more stable.

The results show that the african palm leaves is a material with great characteristics for replacing other cellulosic materials in manufacture of bleached papers and the perborate bleaching stage increases 17 points the pulp brightness and diminishes the color reversion of the bleaching pulps.

---

\*Degree Project

\*\*Faculty of science. Chemical. Msc Guillermo González Sierra

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTO TEORICO.....	4
1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA AFRICANA.....	4
1.1.1. HISTORIA.....	4
1.1.2. CLASIFICACIÓN BOTÁNICA.....	5
1.1.3. ESTRUCTURA DE LA PALMA.....	6
1.1.4. PODA DE HOJAS .....	7
1.1.5. CULTIVOS DE PALMA AFRICANA EN COLOMBIA .....	9
1.1.6. USO ACTUAL DE LA HOJA DE LA PALMA AFRICANA.....	11
1.1.7. PROYECCIÓN FUTURA DEL CULTIVO DE PALMA DE ACEITE .....	15
1.2. COMPONENTES DEL MATERIAL LIGNOCELULOSICO .....	16
1.2.1. CELULOSA .....	16
1.2.1.1. Propiedades de la celulosa .....	18
1.2.1.2. Hinchamiento y disolución.....	19
1.2.2. HEMICELULOSAS .....	19
1.2.3. LIGNINA .....	21
1.2.4. EXTRAÍBLES .....	22
1.3. PROCESOS DE PULPAJE.....	22
1.3.1. PROCESO MECÁNICO.....	22
1.3.2. PROCESO QUÍMICO .....	23
1.3.3. PROCESO SEMIQUÍMICO .....	24
1.3.3.1. Proceso Semiquímico a la Soda Fría.....	25
1.4. PROCESO DE BLANQUEO .....	28
1.4.1. GENERALIDADES.....	28
1.4.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PULPAS .....	29

1.4.3. EFECTOS DEL BLANQUEO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL PRODUCTO .....	30
1.4.4. REVERSIÓN DE LA BLANCURA .....	30
1.4.5. BLANQUEO CONVENCIONAL.....	31
1.4.6. BLANQUEO CON HIPOCLORITO (H) .....	31
1.4.7. BLANQUEO CON PERÓXIDO DE HIDRÓGENO (P) .....	34
1.4.7.1. Reacciones en el blanqueo con peróxido.....	36
1.4.7.2. Características de la pulpa blanqueada con peróxido.....	37
1.4.7.3. Efectos de los Iones Metálicos .....	38
1.4.7.4. Agentes Quelantes y Estabilizantes del Peróxido .....	38
1.4.7.5. Química de los Agentes Quelantes .....	39
1.4.7.6. Condiciones para el blanqueo con peróxido.....	40
1.4.7.7. Bórax .....	43
1.5. EVALUACIÓN DE PULPAS.....	44
1.5.1. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA.....	45
1.5.2. PRUEBAS FÍSICAS .....	46
1.5.2.1. Peso base .....	46
1.5.2.2. Resistencia a la explosión.....	47
1.5.2.3. Resistencia a la tensión.....	48
1.5.2.4. Resistencia al rasgado .....	49
1.5.2.5. Resistencia al dobléz.....	50
1.5.3. PRUEBAS QUÍMICAS .....	51
1.5.3.1. Contenido de lignina.....	51
1.5.4. PRUEBAS ÓPTICAS.....	52
1.5.4.1. Color y blancura .....	52
1.5.5. MEDICIÓN DE LA BLANCURA .....	53
2. PARTE EXPERIMENTAL.....	54
2.1. MATERIA PRIMA .....	54
2.2. CARACTERIZACIÓN Y ADECUACIÓN DEL RAQUIS.....	54

2.3. PROCESO DE PULPAJE A LA SODA FRÍA.....	55
2.3.1. ETAPA QUÍMICA.....	55
2.3.2. ETAPA MECÁNICA.....	56
2.4. BLANQUEO .....	57
2.4.1. 1ª ETAPA: BLANQUEO CON HIPOCLORITO DE SODIO.....	58
2.4.2. 2ª ETAPA: BLANQUEO CON PERBORATO .....	58
2.5. BATIDO O REFINADO DE LA PULPA.....	59
2.6. EVALUACIÓN DE PULPAS.....	61
2.6.1. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y ÓPTICAS .....	61
2.6.2. PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO.....	61
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	64
3.1. MATERIA PRIMA .....	64
3.2. PROCESO DE PULPEO .....	66
3.3. PROCESO DE BLANQUEO .....	67
3.4. PROCESO DE ENVEJECIMIENTO .....	69
3.5. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS .....	71
3.5.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN .....	75
3.5.2. RESISTENCIA A LA EXPLOSIÓN.....	77
3.5.3. RESISTENCIA AL DOBLEZ.....	78
3.5.4. RESISTENCIA AL RASGADO.....	80
3.5.5. VOLUMEN ESPECÍFICO .....	81
EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DEL BLANQUEO.....	82
IMPACTO AMBIENTAL .....	82
CONCLUSIONES .....	98
RECOMENDACIONES.....	101

BIBLIOGRAFÍA..... 102

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Palma Africana.....	5
Figura 2. Componentes vegetativos de la palma africana .....	6
Figura 3. Estructura externa de la hoja de la palma africana. ....	7
Figura 4. Regiones del país con cultivo de palma. ....	9
Figura 5. Proyección futura del cultivo de la palma de aceite.....	16
Figura 6. Estructura microscópica y submicroscópica de la celulosa .....	17
Figura 7. Formación puentes hidrógeno entre moléculas de celulosa.....	18
Figura 8. Componentes de las hemicelulosas. ....	20
Figura 9. Estructuras presentes en la lignina. ....	21
Figura 10. Reacciones del hipoclorito con la lignina según Schweers.....	33
Figura 11. Primera reacción del ión perhidroxilo con la lignina. ....	36
Figura 12. Segundo grupo de reacciones de blanqueo.....	37
Figura 13. Micrómetro .....	47
Figura 14. Medidor de la resistencia a la explosión Mullen Tester .....	48
Figura 15. Tensiómetro TMI (Chopper) .....	49
Figura 16. Probador Elmendorf Tearing Tester.....	50
Figura 17. Probador Folding Endurance Tester.....	51
Figura 18. El Repho .....	53
Figura 19. Pulpa y fibra de hoja de palma africana .....	55
Figura 20. Refinador de discos Sprout Waldron .....	57
Figura 21. Refinador tipo Pila Holandesa Valley Beater.....	60
Figura 22. Prueba de envejecimiento .....	62
Figura 23. Diagrama de bloques de la metodología empleada.....	63
Figura 24. Resistencia a la Tensión vs. CSF .....	75
Figura 25. Resistencia a la Explosión vs. CSF .....	77
Figura 26. Resistencia al Doble vs. CSF.....	78
Figura 27. Resistencia al rasgado vs. CSF.....	80

Figura 28. Volumen específico vs. CFS .....	81
Figura 29. Bomba de alta consistencia.....	83
Figura 30. Mezclador de alta consistencia.....	84
Figura 31. Torre de Pre-retención .....	85
Figura 32. Mezclador de reactivos de baja consistencia.....	86
Figura 33. Mezclador de cloro externo Sund-Impco.....	86
Figura 34. Mezclador dinámico MC.....	87
Figura 35. Torre de Alta densidad, flujo descendente.....	88
Figura 36. Torre de baja densidad, flujo ascendente.....	88

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad en hectáreas cultivadas de palma africana en el país ...	10
Tabla 2. Departamentos con cultivos de palma de aceite.....	11
Tabla 3. Características morfológicas de las fibras de palma de aceite. ....	13
Tabla 4. Características de una hoja de papel de pulpa kraft blanqueada ..	14
Tabla 5. Porcentaje de color original de las pulpas crudas.....	29
Tabla 6. Condiciones utilizadas en el blanqueo con perborato.....	59
Tabla 7. Normas TAPPI utilizadas para la evaluación de pulpas.....	61
Tabla 8. Comparación del análisis químico de la palma africana y bagazo de caña .....	64
Tabla 9. Rendimientos para el proceso de pulpaje.....	66
Tabla 10. Condiciones de operación para el proceso de blanqueo .....	67
Tabla 11. Resultados obtenidos para el proceso de blanqueo. ....	68
Tabla 12. Influencia de la lignina en el % de blancura en las pulpas.....	68
Tabla 13. Datos obtenidos para la prueba de envejecimiento. ....	70
Tabla 14. Ensayo de impregnación. Porcentaje de reversión.....	70
Tabla 15. Propiedades físico-mecánicas .....	72
Tabla 16. Efecto de refino sobre el volumen específico.....	75
Tabla 17. Uso neto de agua de la manufactura de productos de pulpa.....	97

## INTRODUCCIÓN

El consumo de papeles ha experimentado en los últimos años un incremento notable derivado principalmente del aumento de la población y del desarrollo del nivel intelectual, cultural y económico del país.

Con los actuales y futuros programas de renovación de plantaciones se hacen disponibles abundantes cantidades de biomasa; en Colombia la industria de aceite de palma ha ido en aumento; a mediados de la década de 1960 existían 18000 hectáreas en producción, actualmente hay 150000 sembradas distribuidas en cuatro zonas principales y se espera que para el año 2020 sean 743000 hectáreas (FEDEPALMA, 2004); así para mantener la ventaja competitiva se deben adoptar varias estrategias, una de las cuales debe ser la de cero desechos; lo que involucra la conversión de los residuos de la palma de aceite (los cuales en realidad son biomasa) en productos de valor agregado tales como pulpa, papel y cartones de mediana densidad.

Las primeras investigaciones demuestran que las fibras obtenidas de las hojas, del tronco y de los racimos vacíos de la palma de aceite se pueden utilizar para producir pulpa y papel de alta calidad (KAMARUDDYN, 1998). Ahora bien, después de obtener pulpa de alta calidad según los diferentes métodos de cocción es necesario hacer una etapa de blanqueo en la que actualmente la industria papelera ha estado investigando con el fin de reducir su impacto ambiental ya que los métodos convencionales tienen como desechos compuestos clorados perjudiciales para el medio ambiente. La industria papelera ha mejorado sus procesos de blanqueo en lugar de realizar un tratamiento costoso de sus efluentes ha logrado reemplazar el cloro gaseoso que deja residuos tóxicos y cancerígenos en los papeles blancos.

La pulpa de alto rendimiento contiene la mayor parte del material lignocelulósico y en su blanqueo se debe mantener el rendimiento dentro de unos límites elevados; por tanto el proceso de blanqueo no debe ir encaminado a la eliminación de la lignina ni a la disolución de los derivados de ésta, si no a la transformación de los grupos cromóforos responsables del color, en otros grupos incoloros. Por lo que actualmente se está trabajando en la búsqueda y optimización de nuevos agentes de blanqueo libres de cloro con los que se obtengan blancuras elevadas y estables.

En este trabajo se realizó un proceso de blanqueo en dos etapas: la primera con hipoclorito de sodio (H) y la segunda con peróxido de hidrógeno y bórax (P) con el fin de obtener altos niveles de blancura y evitar el proceso de reversión de color o amarillamiento.

Se blanquearon pulpas a la soda obtenidas de la hoja de la palma africana. La etapa de hipoclorito se llevó a cabo a 50°C durante tres horas y se logró una blancura de 64,5% ISO. La etapa de peróxido se realizó después de la de hipoclorito, se aplicaron porcentajes de peróxido de hidrógeno de 3,0 y 1,5% y de bórax de 3,0 y 1,5%. La máxima blancura obtenida fue de 82% ISO. Se evaluaron las propiedades de resistencia de las pulpas obtenidas además se midió la reversión del color mediante calentamiento en una estufa a condiciones controladas. Se evaluó el efecto del bórax aplicado en el blanqueo sobre la reversión del color.

Se espera con este estudio del blanqueo de pulpas a la soda obtenidas a partir de la hoja de la palma africana contribuir al conocimiento de éste material y de su comportamiento en los procesos de blanqueo, con el fin de brindar a la comunidad y a los cultivadores de la palma africana resultados que prometen la posibilidad de usar en un futuro próximo este recurso

renovable en el establecimiento de industrias papeleras en las zonas de cultivo de la palma de aceite.

## 1. FUNDAMENTO TEORICO

### 1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PALMA AFRICANA

#### 1.1.1. Historia

La palma de aceite es una planta tropical propia de climas cálidos. Es un cultivo que tarda entre 2 y 3 años para empezar a producir frutos y puede hacerlo durante más de 25 años. Dentro de los cultivos de semillas oleaginosas es el que produce mayor cantidad de aceite por hectárea. Su origen se ubica en el golfo de Guinea en el África occidental de ahí su nombre científico, *Elaeis guineensis Jacq.*, y su denominación popular: palma africana de aceite.

La palma de aceite fue introducida al país en el año de 1932 por el doctor *Florentino Claes*, director del jardín botánico de Bruselas (Bélgica). Las primeras palmas se plantaron en la estación experimental de Palmira, en el valle del Cauca, pero el cultivo comercial sólo comenzó en 1945 cuando la United Fruit Company estableció una plantación en la zona bananera del departamento del Magdalena. La expansión del cultivo en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido. A mediados de la década de 1960 existían 18.000 hectáreas en producción y hoy existen más de 150.000 hectáreas en 54 municipios del país distribuidos en cuatro zonas productivas:

- ✓ **Norte** - Magdalena, norte del Cesar, Atlántico, Guajira
- ✓ **Central** - Santander, Norte de Santander, sur del Cesar, Bolívar
- ✓ **Oriental** - Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá
- ✓ **Occidental** - Nariño

Colombia es el primer productor de palma de aceite en América Latina y el cuarto en el mundo. (FEDEPALMA, 2004)

### 1.1.2. Clasificación botánica



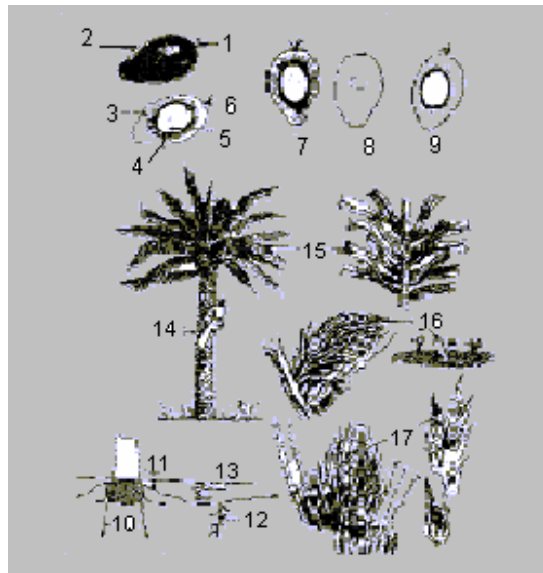
**Figura 1. Palma Africana**

El científico *Hutchinson* ha clasificado la palma aceitera como sigue: División *Fanerógamas*, Tipo: *Angiosperma*, Clase: *Monocotiledóneas*, Orden: *Pálmales*, Familia: *Palmaceae*, Tribu: *Coccoinea* y Género: *Elaeis* (*guineensis* y *oleífera*) (CENIPALMA, 1996; QUESADA, 2002).

La clasificación de la palma de aceite en variedades se basa principalmente en la forma, color y composición del fruto y de las hojas (VALLEJO, 1978).

Los principales componentes vegetativos de las palmas adultas son los frutos, el tronco, follaje, raíces, inflorescencias (ver Fig. 2) (QUESADA, 2002).

### 1.1.3. Estructura de la palma



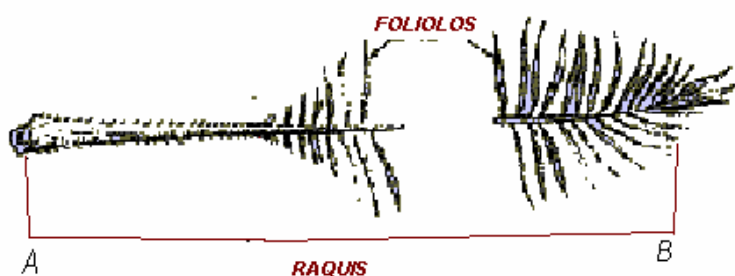
**Figura 2. Componentes vegetativos de la palma africana**

Las partes del fruto son: (1) estigma, (2) exocarpo o epicarpio, (3) mesocarpo o pulpa, (4) endocarpo o cuesco, (5) endospermo o almendra, (6) embrión.

Es difícil diferenciar formas definidas en la palma de aceite. Sin embargo, se distinguen las siguientes variedades: (7) Dura, (8) Pisífera y con la cual se va a trabajar la (9) Tenera.

- ✓ **Raíces, tronco:** La morfología de la palma de aceite es la característica de las monocotiledóneas, de las raíces primarias salen progresivamente sistemas de raíces más finas que forman los sistemas secundarios (observar Fig. 2): (10) raíces de anclaje, (11) raíces primarias, (12) raíces secundarias, (13) raíces terciarias. (14) tronco o estípite.

- ✓ **(15) Hojas:** bajo condiciones normales, el tronco sostiene entre cuarenta y cincuenta y seis hojas. Si éstas no son podadas o cortadas durante la cosecha y actividades de mantenimiento, este número sobrepasa las sesenta hojas (produce entre 20 a 30 hojas por año). Las hojas son de color verde, tienen un largo de 6 a 8 m y están arregladas en espirales sobre el tronco. (ver Fig. 3)



(QUESADA, 2002).

**Figura 3. Estructura externa de la hoja de la palma africana.**

**A-B longitud del raquis**

#### **1.1.4. Poda de hojas**

El número de palmas por hectárea debe calcularse con el objetivo claro de alcanzar el máximo rendimiento (máxima producción). Dado que la palma es una planta de geometría simétrica, la mayor distribución que se logra entre ellas es el triángulo equilátero. Estudios preliminares han demostrado que esta distribución garantiza la menor competencia entre las palmas, para los siguientes factores, fertilidad del suelo, pluviosidad e insolación (FEDEPALMA, 1989).

En conclusión los estudios preliminares recomiendan una densidad de 130 y 160 palmas por hectárea.

El rendimiento del cultivo está relacionado directamente con la producción de las hojas que se cortan una vez al año y en caso necesario dos veces al año.

Para una densidad de 143 palmas por hectárea que es lo que comúnmente se manejan se producen 24 toneladas de racimos al año, es decir, que una palma aproximadamente produce 168 Kg. de racimos y cada uno de estos racimos tiene un peso promedio de 18 Kg.

Para el caso antes mencionado, el número de racimos es de 10 por palma /año y son cortadas 2 hojas por racimo (una que corresponde a la inflorescencia masculina y otra a la femenina), más dos que no dan racimo o que se atrofian, por lo que la producción de hojas es de aproximadamente 22 palma / año.

### 1.1.5. Cultivos de palma africana en Colombia



**Figura 4. Regiones del país con cultivo de palma. (FEDEPALMA, 2002)**

En las tablas 1 y 2 se pueden observar los datos publicados por FEDEPALMA (Federación nacional de cultivadores de palma africana) con referencia a la cantidad de hectáreas sembradas en el país en el 2000, 2001 y 2002.

**Tabla 1. Cantidad en hectáreas cultivadas de palma africana en el país**

Año	Área	Central		Norte		Occidental		Oriental		Totales
		Ha	P (%)	Ha	P (%)	Ha	P (%)	Ha	P (%)	Ha
2000	Sembrada	39126	24,9	42817	27,2	21602	13,7	53783	34,2	157327
	En producción	30498	22,6	35700	26,5	18249	13,5	50325	37,3	134772
	En desarrollo	8628	38,3	7117	31,6	3353	14,9	3458	15,3	22555
2001	Sembrada	43773	26,0	46843	27,8	22794	13,5	55030	32,7	168440
	En producción	32172	23,2	37117	26,8	18381	13,3	50787	36,7	138457
	En desarrollo	11601	38,7	9726	32,4	4413	14,7	4243	14,2	29983
2002	Sembrada	48825	26,4	54259	29,3	25056	13,5	57025	30,8	185165
	En producción	33698	23,2	38878	26,8	19253	13,3	53197	36,7	145027
	En desarrollo	15127	37,7	15381	38,3	5803	14,5	3828	9,5	40138

**P: participación (FEDEPALMA, 2002).**

**Tabla 2. Departamentos con cultivos de palma de aceite**

<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>Ha</b>	<b>(%)</b>
Atlántico	279	0,2
Caquetá	435	0,3
Casanare	8800	5,9
Cauca	95	0,1
Cesar	27319	18,2
Cundinamarca	1826	1,2
La Guajira	73	0,0
Magdalena	24754	16,5
Meta	41237	27,5
Nariño	20996	14,0
Norte Santander	289	0,2
Santander	23818	15,9
Valle del Cauca	132	0,1
<b>Total Nacional</b>	<b>150053</b>	<b>100,0</b>

(FEDEPALMA, 2002)

#### **1.1.6. Uso actual de la hoja de la Palma Africana**

- ✓ **Generación de energía:** La generación de energía a partir de los subproductos de la palma africana, es una ventaja comparativa importante, pues favorece la autogeneración energética que se requiere durante el proceso de extracción del aceite. La cascarilla tiene un poder de combustión de 4,9 Mcal/kg. (BS), la fibra de 4,4 y el raquis de 4,3, valores cercanos a un carbón de mediana calidad, es decir, 6 Mcal/kg. (BS) (OCAMPO, 2002).

- ✓ **Reciclaje de nutrientes:** Entender los ciclos de nutrientes, el origen de los mismos y la dinámica en los procesos productivos, hace factible diseñar alternativas de manejo que mantengan la productividad del suelo o del cultivo, así como lograr un mejoramiento progresivo de las condiciones básicas de la producción. La oportunidad de reciclar importantes cantidades de biomasa proveniente del manejo y explotación del cultivo de palma africana, le permite una mayor autosuficiencia nutricional al cultivo, disminuyendo así la demanda por fertilizantes externos al sistema. El contenido nutricional del raquis, que equivale al 25% del peso del racimo (N 35%, K 22%, P 2.8%, Ca 1,49% y Mg 1,75%), se constituye en una de las vías importante para el retorno de nutrientes; de igual manera, cada tonelada de hojas producto de la poda periódica, aporta al suelo un equivalente de 7,5 kg. de N, 1,06 kg. de P, 9,1 kg. de K y 2,79 kg. de Mg (OCAMPO, 2002).
  
- ✓ **Producción de pulpa para papel:** A nivel internacional Malasia es el productor líder de aceite de palma, con aproximadamente el 52% de la producción mundial de este aceite y el 8,7% de la producción mundial de aceites y grasas del mundo. Razón por la cual investiga en la conversión de los residuos en productos de valor agregado como pulpa, papel y cartón de mediana densidad. Las primeras investigaciones por la colaboración entre el GIRIS (Instituto Gubernamental de Investigación Industrial, Shikoku) y el PORIM y más recientemente entre el PORIM, el FELDA y la papel Oji, demostraron que las fibras obtenidas de las hojas, del tronco, y de los racimos vacíos de la palma de aceite se podían utilizar para producir pulpa y papel de alta calidad.

## Características de las fibras de los racimos vacíos, troncos y hojas de palma de aceite

**Tabla 3. Características morfológicas de las fibras de palma de aceite.**

Característica	Racimos vacíos	Hojas	Troncos	Madera Dura	Madera Blanda
Longitud de fibra (mm) media ponderada	0,67	1,03	1,37	0,83	2,39
Ancho de fibra (mm)	12,50	15,10	20,50	14,70	26,80
Ancho de lumen (mm)	7,90	8,20	17,60	10,70	19,80
Proporción del Runkel	0,59	0,84	0,26	0,37	0,35
Área de la fibra (mm)	75,60	126,20	86,70	79,00	256,10

(PORIM, 1997)

De los tres tipos de fibras de la palma de aceite, la fibra de los racimos vacíos es la más corta, la más angosta y la más pequeña. Las características morfológicas revelan que la fibra de los racimos vacíos se asemeja mucho a la de las maderas duras de fibras cortas, como el eucalipto. El alto número de fibras por unidad de peso indica que el papel hecho con fibras de racimos vacíos tendrá propiedades excepcionalmente buenas para la impresión y buena formación para la fabricación de papel. Aunque la longitud de fibra tanto de los troncos como de las hojas de la palma de aceite es intermedia entre la de madera dura y madera blanda, esta característica es afectada por el alto contenido de parénquima; el contenido de parénquima en el tronco y en las hojas es de alrededor del 50 y 30% respectivamente, contra casi 5% en los racimos vacíos.

## Características de la fabricación de papel de pulpas blanqueadas de biomasa de palma de aceite

De los tres tipos de pulpa de la biomasa de la palma de aceite (tabla 4), la que tiene el perfil más prometedor es la pulpa de los racimos vacíos debido a las siguientes características del papel:

- ✓ Buena firmeza contra desgarre
- ✓ Aguanta golpes.
- ✓ Excelente opacidad.
- ✓ Buen volumen y buen pliegue
- ✓ Buena formación.

**Tabla 4. Características de una hoja de papel de pulpa kraft blanqueada**

Material		CSF (ml)	Opacidad (%)	Densidad (g/m <sup>2</sup> )	Desgarre (mNm <sup>2</sup> /g)	Rasgado (kPam <sup>2</sup> /g)
Racimos Vacíos	CEHD	515	80,6	0,63	11,7	4,8
Hojas	CEHD	370	85,8	0,65	12,7	7,3
Tronco	CEHD	510	68,8	0,60	12,0	6,4
Madera dura	CEHD	450	74,1	0,63	9,5	6,5
Madera blanda	CEHD	560	62,7	0,64	13,1	7,9

Explosión (kPam <sup>2</sup> /g)	Doblez (ciclos)	Permeabilidad de aire (s)	Lisura (s)	Rigidez(mN)
4,5	107	10	9	0,53
5,6	367	56	5	0,85
4,6	165	16	2	0,80
4,5	58	15	4	0,94
7,6	1200	22	-	1,10

(PORIM, 1997)

Los tipos de productos de papel especializado que se pueden producir de la pulpa de racimos vacíos incluyen los siguientes:

- ✓ Papel delgado, de alta calidad, para imprimir.
- ✓ Papeles especializados, tales como papeles para cigarrillos y de fotografía.
- ✓ Papeles de seguridad.
- ✓ Papeles sustitutos en algunos grados de papel, de pulpa de algodón, cáñamo y variedades de cáñamo.

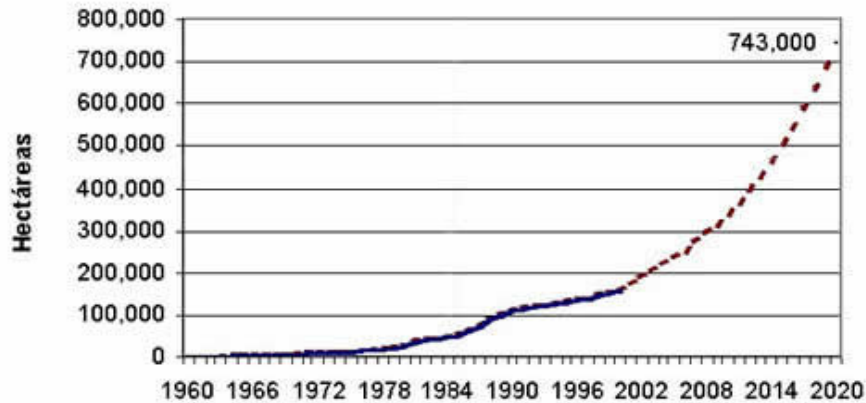
El costo para producir una tonelada de pulpa de racimos vacíos se calcula en US \$800. (PORIM, 1997)

#### **1.1.7. Proyección futura del cultivo de palma de aceite**

El sector de la palmicultura colombiana durante 1999 y 2000 definió su visión de futuro para el 2020; para lograrlo se establecieron las siguientes metas:

- ✓ Multiplicar en siete veces la producción, pasando de 500.000 toneladas en 1999 a cerca de 3,5 millones en el 2020.
- ✓ Incrementar la productividad por hectárea de 3,9 toneladas de aceite en 1999 a 5,5 toneladas en el 2020.
- ✓ Crecer el área sembrada de 170.000 hectáreas en el año 2000 a 743.000 en el 2020, con una tasa de crecimiento del 8% anual, teniendo en cuenta que en Colombia hay 3,5 millones de hectáreas de tierras aptas para el cultivo de la palma de aceite.
- ✓ Crecer en exportaciones de aceite de palma, pasando del 24% de la producción nacional en 2001 al 78% en el 2020.

## Visión 2020 del área sembrada en palma de aceite en Colombia



(FEDEPALMA, 2004)

Figura 5. Proyección futura del cultivo de la palma de aceite.

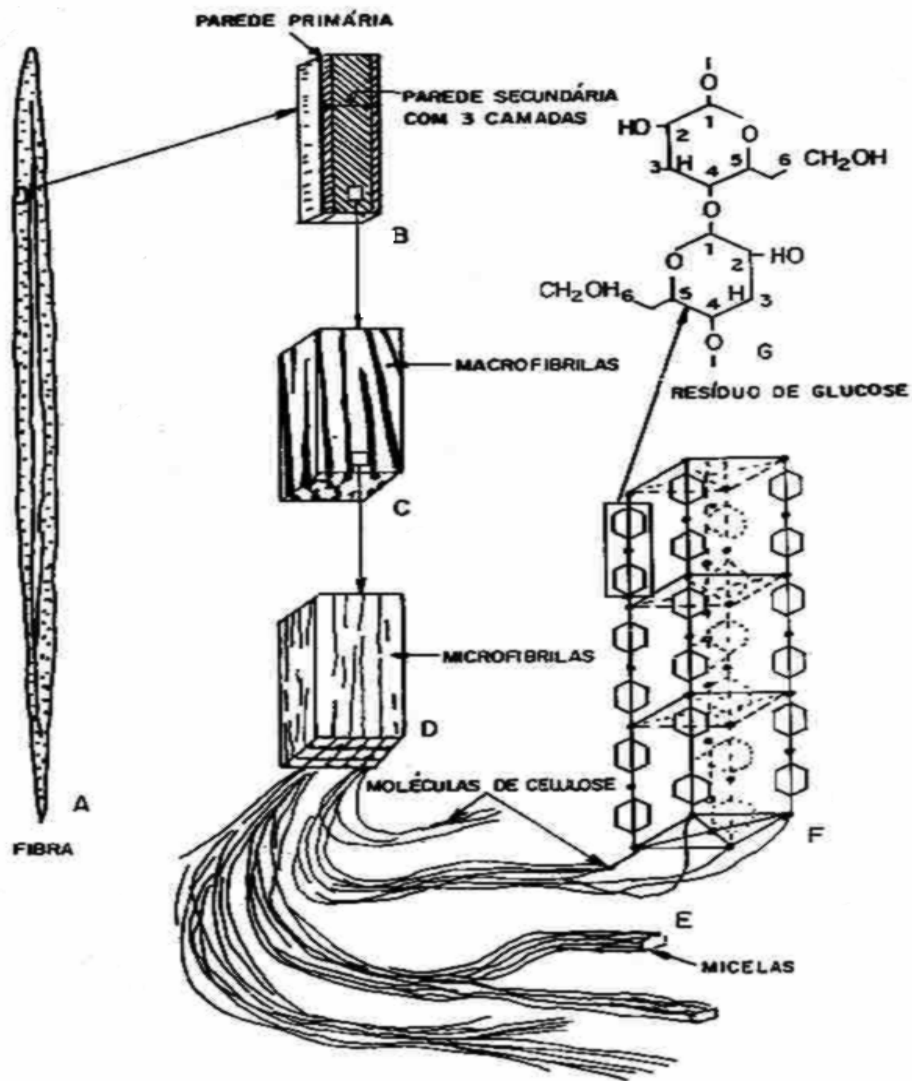
### 1.2. COMPONENTES DEL MATERIAL LIGNOCELULOSICO

Los materiales lignocelulósicos son compuestos básicamente por celulosa, hemicelulosa, lignina y constituyentes menores (extraíbles). Por otra parte, al referirse a materiales celulósicos no maderables, como el bagazo de caña, y el raquis de la hoja de palma africana, se presentará un alto contenido de parénquima o médula.

#### 1.2.1. Celulosa

La celulosa es el componente principal de la pared celular de la fibra, es un polisacárido de cadena lineal constituido por un único tipo de unidades de azúcar,  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , unidades de monosacáridos  $\alpha$ -D-glucosa, como se

ilustra en la figura 6. En dicha figura se muestra parte del tejido vegetal donde se resalta la pared celular (esquina superior izquierda) y su estratificación de manera esquematizada.

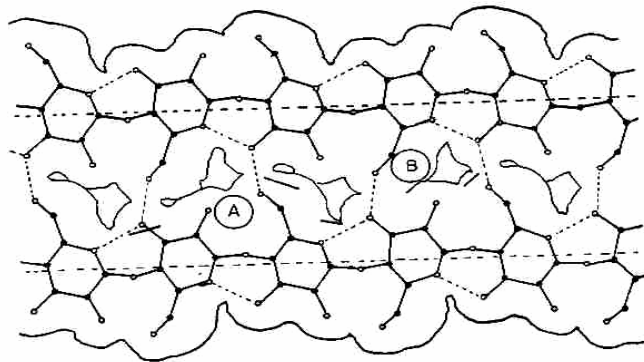


(D'ALMEIDA.1988)

Figura 6. Estructura microscópica y submicroscópica de la celulosa

Las moléculas de celulosa tienden a formar puentes de hidrógeno (Figura 7) intramoleculares (entre unidades de glucosa de la misma molécula, A) e intermoleculares (entre unidades de glucosa de moléculas adyacentes, B).

Este tipo de uniones son responsables de una cierta rigidez de las cadenas unitarias y de la formación de la fibra vegetal, o sea que las moléculas se alinean formando unas microfibras, que unidas forman fibras, que a su vez se ordenan para formar sucesivas paredes celulares de la fibra (D'ALMEIDA, 1988).



(D'ALMEIDA.1988)

**Figura 7. Formación puentes hidrógeno entre moléculas de celulosa**

#### **1.2.1.1. Propiedades de la celulosa**

La celulosa se halla presente en todos los vegetales superiores, es una sustancia blanca, algo traslúcida y con una longitud aproximada de 1.03 nm. En el aspecto químico, la celulosa es el único constituyente fibroso de los materiales lignocelulósicos, es completamente insoluble en agua, alcohol, éter, ácidos y álcalis diluidos. A temperatura ambiente es inalterable en

contacto con el aire; pero cuando se encuentra húmeda y en estado impuro, se descompone lentamente.

#### **1.2.1.2. Hinchamiento y disolución**

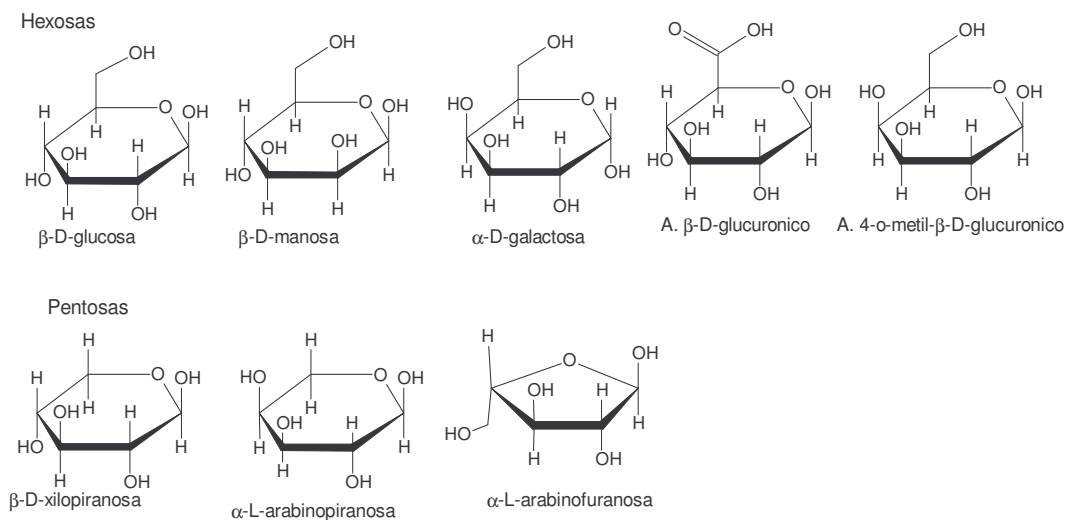
La celulosa se hincha con diferentes solventes; la extensión del hinchamiento depende del solvente y de la naturaleza de la muestra de celulosa. En el caso de la celulosa nativa con estructura fibrosa tienen lugar cambios morfológicos más o menos drásticos, dependiendo de si el hinchamiento es *interfibrilar* o *intrafibrilar*. De manera más general, las diferencias se distinguen en términos de hinchamiento *intercristalino* o *intracristalino*. En el primer caso el agente de hinchamiento entra sólo en las regiones desordenadas (amorfás) de las microfibras de celulosa, mientras que en el segundo se penetran las regiones ordenadas (cristalinas). Cuando las fibras de celulosa anhidra se exponen a la humedad, absorben agua y la sección cruzada de las fibras se incrementa debido al hinchamiento. A un 100% de humedad relativa este hinchamiento corresponde aproximadamente a un 25% de incremento en el diámetro de la fibra. Se tiene otro incremento de 25% cuando el hinchamiento tiene lugar al sumergir las fibras en agua. En la dirección longitudinal el cambio es muy pequeño. La retención de agua en las fibras de celulosa a una humedad relativa dada varía dependiendo de si el equilibrio tiene lugar por adsorción o por desorción (histéresis).

#### **1.2.2. Hemicelulosas**

Son carbohidratos no celulósicos que al igual que la celulosa sirven como material de soporte de la pared celular de las plantas. Están constituidos fundamentalmente por azúcares del tipo pentosa y hexosa que polimerizan entre si y forman polisacáridos heterogéneos.

Las hemicelulosas son generalmente insolubles en agua, solubles en álcali y más fácilmente hidrolizables en ácido que la celulosa. Estructuralmente se diferencian de la celulosa en que no son fibras, están ramificadas y tienen masas moleculares más bajas, la mayoría tienen un grado de polimerización de 200.

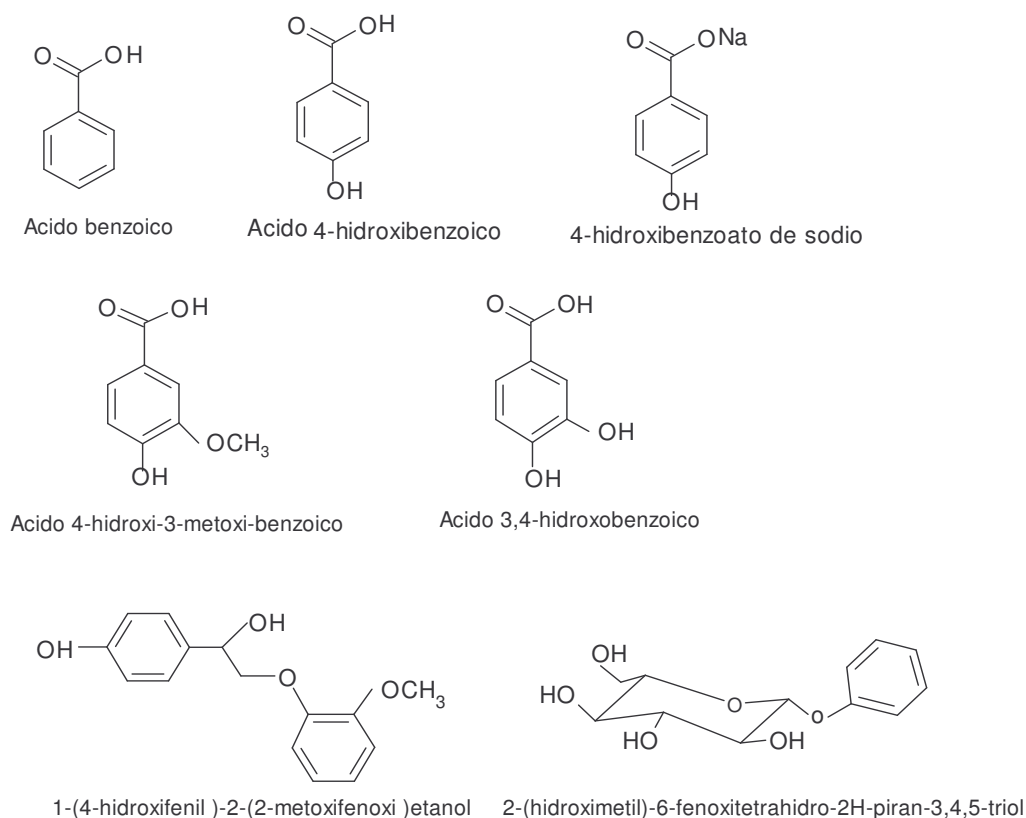
Las hemicelulosas son responsables de diversas propiedades de los materiales celulósicos. Debido a la ausencia de cristalinidad, su bajo peso molecular y su configuración ramificada e irregular, las hemicelulosas absorben agua con facilidad. Esta cualidad contribuye a la movilidad interna y al aumento de flexibilidad de las fibras, una reducción en el tiempo y energía requeridos para la refinación de la pasta celulósica; y un aumento del área específica o de unión de las fibras. (SANJUÁN, 1997)



**Figura 8. Componentes de las hemicelulosas. (SANJUÁN, 1997)**

### 1.2.3. Lignina

La lignina es un polímero aromático heterogéneo que forma parte de los tejidos de los vegetales, su principal función es formar la lámina media que adhiere las fibras unas con otras. Es uno de los componentes principales de la madera y constituye del 20 al 30% de la materia orgánica del reino vegetal. La lignina es el polímero natural más importante después de la celulosa, en los vegetales superiores, está constituida principalmente por unidades de fenilpropano enlazadas en tres dimensiones. La unidad de fenilpropano consta básicamente de un anillo aromático y de una parte alifática de tres átomos de carbono denominados  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  (alfa, beta y gama). (SAN JUAN, 1997; LIBBY, 1969)



**Figura 9. Estructuras presentes en la lignina. (SHEVCHENKO, 1996)**

#### **1.2.4. Extraíbles**

Además de la holocelulosa y la lignina, existen otras sustancias en las plantas que varían de manera notable entre las diferentes especies, así como por su ubicación geográfica, la mayoría de estos compuestos son solubles en agua o solventes orgánicos, se denominan extraíbles y por lo general solo representan una pequeña fracción de la planta, se puede afirmar que el color, olor y flamabilidad de algunas maderas son atribuibles a sus extractos. Entre los principales solventes se encuentran: el etanol, la acetona, el diclorometano y el éter. En general los extraíbles pueden dividirse en tres grupos:

- ✓ Terpenos y terpenoides
- ✓ Compuestos alifáticos (grasas y ceras)
- ✓ Compuestos fenólicos

### **1.3. PROCESOS DE PULPAJE**

El papel se fabrica por laminación de una suspensión de fibras celulósicas de origen vegetal. Para elaborar dicha suspensión ó "pulpa" es necesario liberar las fibras de los demás materiales lignocelulósicos con un tratamiento químico, mecánico o con una combinación de ambos; este tratamiento se denomina pulpeo; y la composición química de la pulpa depende del sistema empleado en su obtención. (CACERES, 1978)

#### **1.3.1. Proceso mecánico**

La pulpa mecánica es el producto de la desfibración de la madera mediante un sistema exclusivamente mecánico con pequeño o ningún tratamiento químico. Las fibras se desgarran de la madera, por lo que varían en longitud y composición, además de conservar prácticamente inalterada su

composición química (excepto por los compuestos solubles en agua); en consecuencia las fibras no existen como entidades individuales sino como grupos y fragmentos, por lo tanto la pulpa mecánica es una mezcla de haces fibrosos, fibras individuales y fibras rotas. Al conservarse en la pulpa toda la lignina el rendimiento se eleva entre 90 y 95%. La blancura corresponde a la coloración original de la madera. La pulpa toma un color amarillento y las fibras se tornan quebradizas después de un periodo de exposición a la luz debido a que la lignina no tiene cualidades de permanencia a la oxidación catalítica inducida por los rayos ultravioleta.

Debido a que no se utilizan reactivos químicos la pulpa resultante es de bajo costo, por lo que se presta para la fabricación de papel periódico, papeles de impresión, papeles murales, absorbentes, etc.

### **1.3.2. Proceso químico**

El proceso químico de pulpeo consiste esencialmente en mezclar la materia fibrosa (reactante) con una solución acuosa de sustancias inorgánicas (reactivo) denominada licor de cocción, cuya composición varía de acuerdo con el proceso que se utilice, y también de acuerdo con el uso que se le vaya a dar a la pulpa. El proceso se realiza bajo condiciones controladas de temperatura, presión y tiempo. Las variables de este proceso que tienen una gran influencia en las propiedades de la pulpa son las siguientes:

- ✓ Cantidad de reactivos inorgánicos
- ✓ Tiempo y temperatura de cocción
- ✓ Relación licor / material fibroso (hidromódulo)
- ✓ Tipo, tamaño y calidad de la materia prima fibrosa

Los rendimientos son mucho más bajos que en el pulpaje mecánico, generalmente de 45 a 52%, esta disminución se compensa con las altas

resistencias que presentan las pulpas químicas, por esta razón su uso está en la fabricación de papeles industriales.

### **1.3.3. Proceso Semiquímico**

Existen actualmente procesos intermedios; un proceso semiquímico se divide en dos etapas: la primera, es un tratamiento químico al material lignocelulósico. El objetivo aquí es romper los enlaces interfibrilares removiendo algunas hemicelulosas y alguna porción de lignina; en este caso el tratamiento químico no es fuerte, siendo necesaria una etapa mecánica posterior para lograr la separación de las fibras, aunque es normal, que ocurra un pequeño rompimiento de éstas. Teóricamente el rendimiento en los procesos semiquímicos debe encontrarse entre el que se obtiene en los procesos puramente químicos y puramente mecánicos es decir entre el 55 y el 92%; en la práctica los rendimientos varían entre el 70 y el 85%. Las características de las pulpas son así mismo intermedias. Es decir, las resistencias son más altas que las que presenta una pulpa mecánica y menores que las de una pulpa química.

Los procesos semiquímicos en especial a la soda fría, se han desarrollado buscando como objetivos principales mejorar el rendimiento, disminuir costos y problemas ambientales.

Todos los materiales se prestan para ser procesados por métodos semiquímicos, pero varían ampliamente en conveniencia y respuesta. La experiencia ha demostrado que los materiales fibrosos utilizados para pulpas semiquímicas, se pueden clasificar en orden de su empleo, de acuerdo con sus características botánicas, como sigue: (LIBBY, 1969; D'ALMEIDA, 1988).

1. Dicotiledóneas o angiospermas (árboles de hojas caducas - maderas duras)
2. Gimnospermas (árboles de hojas perennes - maderas suaves)
3. Monocotiledóneas (cañas, gramíneas y carrizos)

#### **1.3.3.1. Proceso Semiquímico a la Soda Fría**

El proceso semiquímico a la soda consiste en tratar la madera en forma de astillas en dos etapas: primero un tratamiento químico con hidróxido de sodio bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo, éste tratamiento es suave y tiene como fin hinchar las fibras, este fenómeno crea esfuerzos en la estructura del material originados por la expansión de las capas exteriores de la fibra donde se encuentra la lignina, produciendo un efecto debilitador en los enlaces que mantienen unidas las fibras. La expansión es mayor cuanto mejor penetre el licor de soda en la madera. Finalizada esta etapa, las astillas libres o no de licor pasan a la etapa mecánica llamada desfibración. Después de dos o tres pasos por el desfibrador se logra separar las fibras en una extensión considerable obteniéndose la pulpa que se usa posteriormente en la fabricación del papel y un licor negro donde van disueltos la lignina, los productos de digestión y el hidróxido de sodio residual.

Para la selección de variables del proceso semiquímico a la soda en frío (SQSF) se toman en cuenta las sugeridas por las normas TAPPI.

**Etapa química:** En esta etapa, el material fibroso se somete a la acción de un agente químico, con o sin aplicación de calor, que tiene como objeto debilitar la unión lignina-carbohidratos. Las variables que intervienen en esta

etapa del proceso, además de la influencia de la composición química y la constitución de la materia prima son:

- ✓ Concentración de reactivos
- ✓ Temperatura máxima de digestión
- ✓ Tiempo a máxima temperatura
- ✓ Relación licor-madera

### **Concentración de reactivos**

El propósito en la etapa química en el proceso a la soda fría es conseguir la total impregnación de la fibra. El hinchamiento es más rápido cuando la penetración es completa, el álcali debe difundirse desde los conductos (lumen), hasta el interior de la fibra.

Al aumentar la concentración del licor de digestión, se verifica un incremento de la cantidad de NaOH absorbido, trabajando a una misma temperatura y tiempo de contacto, así mismo se aprecia la disminución en el rendimiento, y un menor consumo de energía durante la desfibración; al tiempo que aumenta el consumo de soda también mejoran las propiedades mecánicas (explosión, tensión y rasgado). Parte de este álcali, es consumido en la neutralización de los ácidos formados por la degradación de hemicelulosas (BRAUNS, 1996; SAKANEN, 1971).

La literatura recomienda trabajar con concentraciones de NaOH de 25-50 g/l.

### **Efecto de la temperatura**

No es conveniente según la literatura consultada, trabajar a temperaturas superiores a los 90 °C, pues si bien es cierto se aumenta la velocidad de

penetración y de reacción, disminuye el rendimiento y la blancura de las pulpas. En todo caso la temperatura dependerá de las otras condiciones de digestión y del tipo de pulpa que se desee obtener.

### **Efecto del tiempo de digestión**

El tiempo de tratamiento está en función de la velocidad de penetración del licor en las fibras. Esta variable afecta las características de la pulpa de manera muy similar que la temperatura y la concentración de los reactivos. Para facilitar la penetración se emplean diversos métodos mecánicos que permitan disminuir el tiempo de operación. Al aumentar el tiempo se incrementa el consumo de reactivos, se mejoran las resistencias de la pulpa, disminuye el rendimiento y decrece el consumo de energía durante el desfibrado. (CACERES, 1978; D'ALMEIDA, 1988; LIBBY, 1969).

**Etapas mecánicas:** En el proceso semiquímico a la soda en frío la etapa mecánica tiene tanto o más importancia que la etapa química. Involucra una serie de efectos mecánicos y térmicos destinados a separar las fibras, que dependen de:

- ✓ Tamaño de la astilla.
- ✓ Contenido de humedad de la astilla.
- ✓ Temperatura de desfibración.
- ✓ Consistencia.
- ✓ Distancia entre discos.
- ✓ Número de pasadas.
- ✓ Velocidad de alimentación.
- ✓ Diseño de la superficie de discos

Experimentalmente se ha comprobado que: La astilla pequeña y de tamaño uniforme produce pulpas con mejores resistencias físico-mecánicas que aquellas donde el material no es homogéneo y de gran tamaño.

Astillas secas, dan lugar a un alto consumo de energía y un considerable porcentaje de finos que perjudican la calidad de la pulpa.

La desfibración se recomienda hacerla en caliente, tal y como sale de la etapa química de esta manera se aumenta la resistencia de la pulpa y disminuye la cantidad de energía requerida.

La consistencia empleada depende del equipo disponible. Entre 5-15% de consistencia se presenta un aumento en la resistencia a la explosión de las pulpas. Al incrementarse la consistencia a niveles superiores del 25% se ha encontrado ahorro en el consumo de energía y obtención de pulpas bien desfibradas. También influyen sobre la calidad de las pulpas obtenidas:

- ✓ Tipo de equipo.
- ✓ Área efectiva de desfibración.
- ✓ Velocidad de rotación de los discos

## **1.4. PROCESO DE BLANQUEO**

### **1.4.1. Generalidades**

El propósito fundamental de la operación de blanqueo es destruir la coloración grisácea o amarillenta que puede quedar en la pulpa deslignificada y eliminar la lignina remanente, causante del color, a través de sus grupos cromóforos. Estos grupos deben ser transformados químicamente en estado sólido para disminuir sus propiedades de absorción de luz, o ser oxidados, reducidos o hidrolizados para hacerlos solubles y removerlos de la pulpa, es decir el blanqueo se puede lograr de dos formas: (RYDHOLM, 1985)

- ✓ Por modificación de los grupos coloreados, sin extraer la lignina que es su portadora
- ✓ Por extracción de la lignina

Las operaciones buscadas dependen de la calidad de la pulpa cruda y de las características buscadas en el producto final. Simultáneamente se busca cumplir otras condiciones como: (REGLA, 1979; RYDHOLM, 1985)

- ✓ Estabilidad del color
- ✓ Mantenimiento de las propiedades de resistencia mecánica y otras propiedades físicas

#### 1.4.2. Características de las pulpas

Las operaciones y condiciones usadas en el blanqueo dependen de la calidad de la pulpa y de la función que esta va a cumplir. A continuación se presenta el color original de las pulpas crudas:

**Tabla 5. Porcentaje de color original de las pulpas crudas.**

PULPA	BLANCURA % ISO
Pulpas kraft y a la soda	25 – 30
Semiquímica al sulfito neutro	30 – 40
Bisulfito y sulfito ácido	55 – 65
Mecánica	50 – 60

(SAN JUAN, 1997)

Como se observa hay una dependencia del color original con el proceso de pulpaje, pero no siempre hay relación entre las propiedades ópticas de la pulpa y las del papel, pero en la mayoría de los casos el proceso de blanqueo tiene efecto sobre las características físicas, químicas, y mecánicas del producto final.

### **1.4.3. Efectos del blanqueo sobre las propiedades del producto**

El proceso de blanqueo al incidir sobre el material crea cambios en su composición química y realiza alteraciones en sus propiedades papeleras. Estos efectos dependen del contenido de lignina y de la eliminación o destrucción de los grupos cromóforos. Se producen cambios en el comportamiento físico y químico de las fibras las cuales mejoran la resistencia mecánica de la pulpa. La pérdida de hemicelulosas en las etapas de extracción alcalina afecta la resistencia mecánica, disminuyendo la longitud de ruptura y el factor de explosión pero aumenta el factor de rasgado, lo mismo que la opacidad. (RYDHOLM, 1985)

### **1.4.4. Reversión de la blancura**

La blancura de los productos crudos y blanqueados no es permanente. La estabilidad de la blancura lograda es variable de acuerdo con ciertos factores que inciden entre ellos:

- ✓ Temperatura ambiente.
- ✓ Alcalinidad o acidez del medio.
- ✓ Condiciones de blanqueo.
- ✓ Reactivos químicos.
- ✓ Composición química de la pulpa.

Los responsables de la inestabilidad son: el contenido de lignina residual, en el caso de pulpas de alto rendimiento, las trazas de lignina, la presencia de derivados clorados, insolubles en agua y en alcohol-benceno, y grupos carbonilo, en moléculas de carbohidratos. También influyen en menor grado los grupos aldehído y carboxilo. Las etapas de blanqueo influyen en la reversión en diferente forma, según sea su posición en la secuencia.

#### **1.4.5. Blanqueo convencional**

Cuando se necesita una blancura alta, es necesario aplicar métodos con remoción de lignina y se pueden considerar como una continuación del proceso de cocción, con reactivos más selectivos pero también más costosos. Los métodos de blanqueo con remoción de lignina son menos dependientes del color de la pulpa pero si del proceso de obtención ya que la cantidad de lignina remanente determinará el consumo de agentes blanqueantes. Típicamente en un blanqueo en una etapa no es posible eliminar el total de la lignina. Es más eficiente y económico trabajar en un sistema de etapas múltiples.

El blanqueo convencional (C-E-H) se inicia con la adición de cloro, que sólo oxida la lignina sin disolverla, seguido por una extracción alcalina que consiste en la remoción de las cloroligninas formadas en la primera etapa, mediante soluciones diluidas de hidróxido de sodio (NaOH). Finalmente se usan agentes oxidantes como los hipocloritos de calcio o sodio, los cuales son los verdaderos blanqueadores, puesto que se agregan a fin de eliminar la lignina residual. (GRANT, 1968; RYDHOLM, 1985; REGLA, 1979)

#### **1.4.6. Blanqueo con Hipoclorito (H)**

El hipoclorito de sodio fue el primer reactivo químico usado para blanquear pulpa. El uso de este reactivo ha continuado a través del tiempo debido a que ofrece dos ventajas principales: (RYDHOLM, 1985; REGLA, 1979)

- ✓ Bajo costo.
- ✓ Degradación controlada de la celulosa

El hipoclorito sin embargo, no es bastante específico en su ataque a la lignina. Si el pH baja de 9 (Valor considerado seguro) comienza a

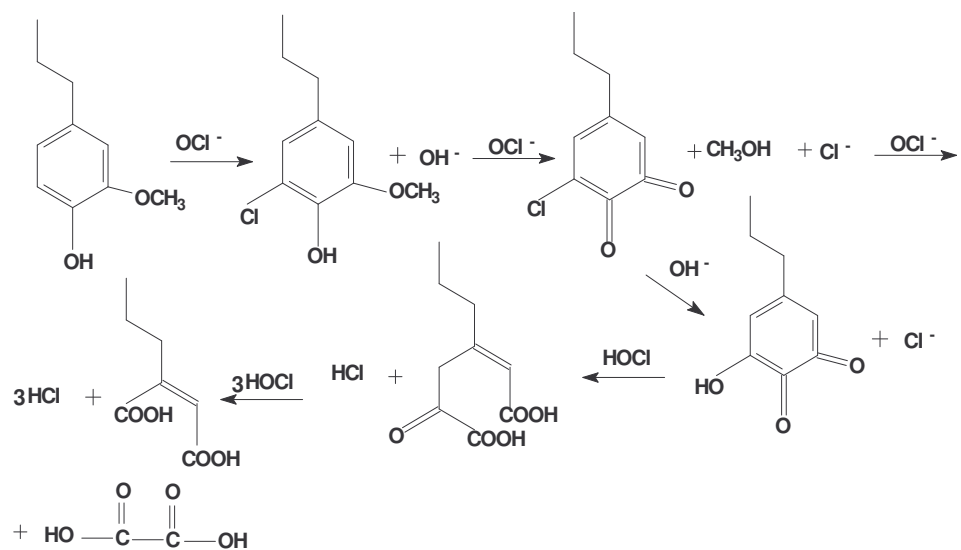
presentarse el efecto oxidante creciente del ácido hipocloroso degradando carbohidratos en forma irreversible.

Cuando se usa con peróxido, se usa normalmente en las primeras etapas de una secuencia de blanqueo, con el fin de disminuir el consumo de reactivos más costosos en las etapas finales, que son las más críticas.

El rango y proporción de la reacción de blanqueo con hipoclorito depende de la naturaleza de la pulpa, temperatura, pH, tiempo de blanqueo, consistencia, y porcentaje de reactivo aplicado a la pulpa.

La temperatura normal de blanqueo varía de 30 a 60°C. La velocidad de reacción entre el hipoclorito y la fibra se duplica por cada 7°C que se aumente la temperatura, y esto es independiente de la consistencia y el pH. La temperatura óptima depende de las demás condiciones, los resultados deseados y el equipo empleado.

El blanqueo con hipoclorito es una reacción exotérmica. Cada gramo de cloro activo consumido libera 1100 calorías. Teóricamente el consumo de cada 1% de cloro activo (respecto a pulpa base seca) incrementará la temperatura cerca de 0,6°C a 5% de consistencia ó cerca de 1,8°C a 15% de consistencia. En la práctica, la temperatura inicial es la que se controla ya que la temperatura no cambia significativamente por la reacción.



(HOFFMAN, 1979)

**Figura 10. Reacciones del hipoclorito con la lignina según Schweers**

Las soluciones blanqueadoras de hipoclorito se preparan normalmente con suficiente exceso de álcali para dar un pH de 12. Al reaccionar la pulpa se forman ácidos. Cierta acidez se debe al HCl formado por la reacción de sustitución y otra a la producción de ácidos orgánicos y  $\text{CO}_2$ . Esta combinación de ácidos disminuye el pH rápidamente y promueve la degradación de la pulpa. Al finalizar la etapa el pH debe ser superior a 9, ya que a pH inferiores la celulosa estará expuesta a la degradación por presencia de ácido hipocloroso. El pH alto ayuda a disminuir la reversión de color. (NAVARRO, 1985; RYDHOLM, 1985)

Se ha reportado que la oxidación de hipoclorito sobre la celulosa a pH alto favorece la formación de grupos carboxilo relativamente estables, mientras que la misma reacción a pH bajo favorece la formación de grupos carbonilo relativamente inestables y en consecuencia produce una mayor reversión del

color. Si se añade mucho álcali al inicio del blanqueo puede retardarse la reacción considerablemente y no ocurrir ningún blanqueo en el tiempo normal.

La concentración de hipoclorito disminuye durante el proceso de blanqueo. Si se hace muy bajo, la reacción de blanqueo se hace muy lenta, por lo tanto, se deja un exceso razonable de cloro activo al final del blanqueo. Si el hipoclorito es consumido totalmente, puede ocurrir una reversión del color.

El tiempo reacción depende también de la temperatura utilizada en la etapa de blanqueo. Sin embargo, se emplean entre una y dos horas para la primera etapa. Para la consistencia se recomienda usar valores entre 12 y 16% con el fin de utilizar recipientes más pequeños y ahorrar calor. (REGLA, 1979; RYDHOLM, 1985)

#### **1.4.7. Blanqueo con Peróxido de Hidrógeno (P)**

El mecanismo de blanqueo del peróxido es diferente al resto de los agentes oxidantes, mientras que con los demás agentes ocurre una desfragmentación de los compuestos no carbohidratados en moléculas pequeñas que se remueven por solubilización, los peróxidos solamente inactivan los grupos de color que están acoplados a moléculas mayores sin atacar severamente la estructura principal. (FLORES, 1972; PATT, 1982; RAPHSON, 1963)

El efecto blanqueante del peróxido ha sido atribuido a la acción oxidativa del ión perhidroxilo que reacciona con los grupos cromóforos (grupos carbonilo conjugados) para producir aldehídos y ácidos carboxílicos incoloros (KRÜGER, 1981). Salvo en el caso que se utilicen condiciones drásticas, una pequeña cantidad (0,5%) de la lignina original es solubilizada, es decir,

el tratamiento de la lignina con peróxido álcali elimina grupos cromóforos originales sin una apreciable degradación o solubilización de la lignina.

La combinación de alta alcalinidad, alta temperatura, alto poder oxidante y un prolongado período de reacción, producen una blancura más estable que la obtenida por cualquier otro agente de blanqueo oxidante.

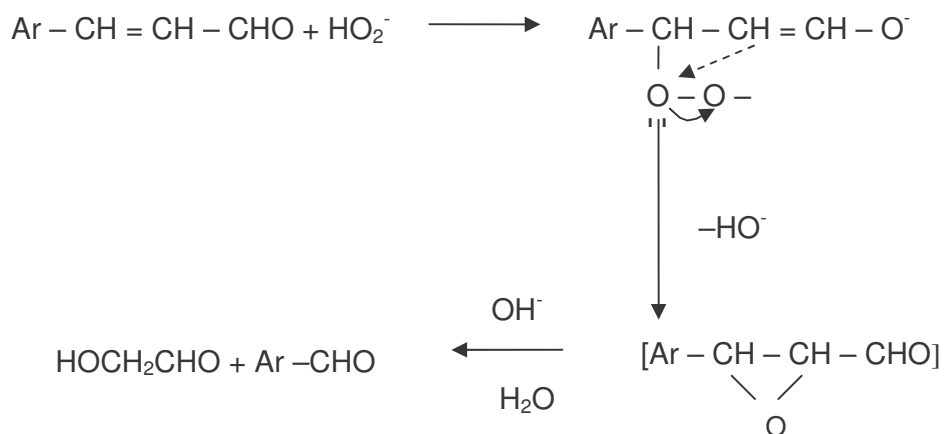
Los peróxidos no ejercen gran influencia sobre la celulosa y hemicelulosas bajo las condiciones normales de blanqueo, por lo que no ocurren cambios en el freeness, volumen y fuerza de las fibras, la opacidad es solo levemente disminuida, mientras que la absorbancia y propiedades de impresión son mejoradas.

En general no son muchos los detalles conocidos de la acción del peróxido y se cree que esta se divide en dos mecanismos, uno eliminando y otro formando grupos cromóforos. El ataque puede ocurrir al grupo alcohol coniferílico u otros grupos carbonilos y/o fenoles, conduciendo a la formación de carboxilatos y fenolatos. Posiblemente el peróxido destruya los grupos orto-quinona, eliminando el sistema que causa reversión, lo que explica la gran estabilidad exhibida por la pulpa blanqueada con éste reactivo. (RYDHOLM, 1985)

Para evitar el riesgo del “amarillamiento” se necesita un peróxido residual que varía del 30 al 50% del añadido.

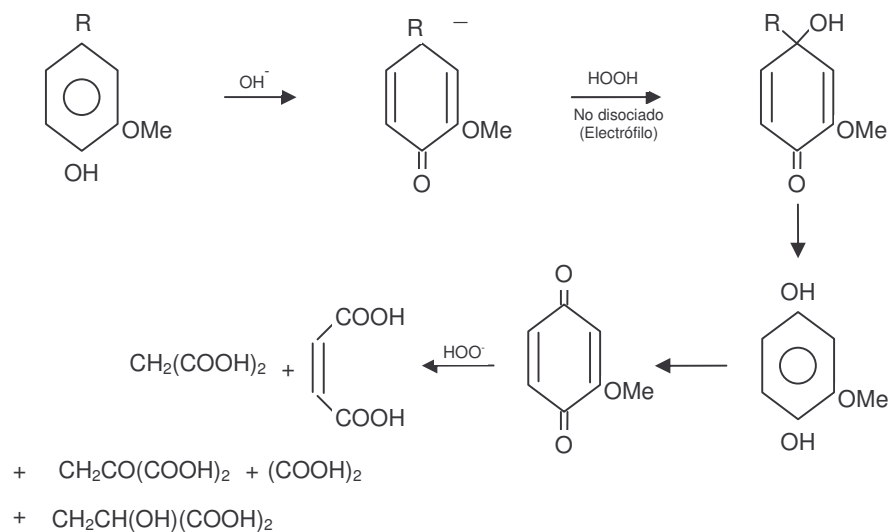
### 1.4.7.1. Reacciones en el blanqueo con peróxido

1. La reacción se inicia cuando el ión perhidroxilo ( $\text{HO}_2^-$ ) ataca los centros electrofílicos de la lignina actuando como nucleófilo. (CACERES ROJAS, 1983)



**Figura 11. Primera reacción del ión perhidroxilo con la lignina.**

2. El segundo grupo de reacciones es iniciado por un anión fenólico que ataca una molécula de peróxido no disociada actuando como electrófilo. (CACERES ROJAS, 1983; PERKINS, 1975)



**Figura 12. Segundo grupo de reacciones de blanqueo.**

#### 1.4.7.2. Características de la pulpa blanqueada con peróxido

Se ha encontrado que el peróxido mejora las propiedades físico mecánicas, tiene un pequeño efecto sobre las propiedades ópticas y el rendimiento. (RYDHOLM, 1985)

Se ha constatado que el volumen específico y las propiedades de resistencia se elevan un poco. La opacidad es levemente disminuida debido a la ganancia de blancura. El freeness como medida no cambia, mientras que las propiedades de trabajo y drenaje sobre la máquina de papel se alteran, y la absorbancia y las propiedades de impresión se mejoran. (RYDHOLM, 1975)

Además el peróxido produce una blancura más estable que la obtenida por cualquier otro agente de blanqueo oxidante, esto es debido a que los

peróxidos no ejercen gran influencia sobre la celulosa y hemicelulosa bajo condiciones normales de blanqueo.

#### **1.4.7.3. Efectos de los Iones Metálicos**

La presencia de iones metálicos pesados en soluciones de peróxido o en la pulpa causará la descomposición del mismo en agua y oxígeno. Estos pueden provenir de la madera, otras materias primas y del agua de la planta. Particularmente los que ofrecen más problemas son el hierro, cobre, manganeso, cobalto, cromo, y níquel. La actividad de éstos se incrementa al aumentar el pH. (CACERES ROJAS, 1983), (RYDHOLM, 1985), (REGLA, 1979).

Dick, indica que cuando la pulpa contiene hierro, y es tratada con agentes secuestrantes, el hierro no puede lavarse de la pulpa y concluye que combinado fuertemente con la pulpa, no puede causar descomposición del peróxido.

#### **1.4.7.4. Agentes Quelantes y Estabilizantes del Peróxido**

El peróxido de hidrógeno es muy sensible a la descomposición catalítica en presencia de iones metálicos, por éstos motivos las soluciones de peróxido deberán tamponarse y estabilizarse antes de que entren en contacto con la pulpa, pues un incremento en el contenido de los metales incrementa la cantidad de estructuras coloreadas de la pulpa y también promueve la descomposición del peróxido; todo esto afecta la disminución de la blancura. (PATT, 1982).

El uso de agentes quelantes evita la descomposición del peróxido, puesto que éstos atrapan los iones metálicos presentes en la pulpa. La dosis a

emplear y el tiempo varían en función de la pulpa, instalación, materiales que lo componen y características del agua del proceso.

Dentro de los iones metálicos el manganeso es el más peligroso, por lo tanto es importante la adición de un secuestrante, el DTPA ha mostrado ser el más efectivo. (LACHENAL, 1981).

Las experiencias hechas por Gonzáles G. muestran que la efectividad de los agentes, se logra mediante la combinación de tres sustancias, sulfato de magnesio, silicato de sodio y el secuestrante (DTPA).

#### **1.4.7.5. Química de los Agentes Quelantes**

Los iones metálicos  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+2}$  generalmente presentes como cationes están disponibles para reaccionar y enlazarse con ligninas, compuestos fenólicos, o aniones más simples como carbonato o hidróxido y formar compuestos insolubles o compuestos completamente coloreados. También tienen un fuerte efecto catalítico y pueden crear reacciones laterales indeseables.

Un quelante es un compuesto cargado negativamente capaz de formar una estructura fuerte de anillo que incorpora los iones metálicos, éste altera la reactividad del ión metálico y previene las reacciones laterales. (HART, 1981)

**Ácido dietilentriamino pentacético (DTPA):** Es uno de los mejores agentes secuestrantes, que evita la descomposición del peróxido. La dosis y el tiempo varían. Generalmente se acepta una adición de 0.2 a 0.5%, además combinado con el magnesio da una mejor blancura que cuando está solo (ALFTHAN, 1977), (REGLA, 1979).

La presencia del DTPA en el blanqueo aumenta en promedio dos puntos de blancura, provee una utilización más eficiente del peróxido y además puede reducir o eliminar la adición del silicato de sodio actuando el sulfato de magnesio como estabilizador. (HART, 1981)

**Sulfato de magnesio:** Tiene un efecto marcado como estabilizante sobre las soluciones alcalinas del peróxido bajo las condiciones del blanqueo. Los iones de magnesio son algunas veces añadidos para proteger los carbohidratos de la degradación. (ALFTHAN, 1977). El magnesio actúa por inhibición del efecto catalítico de las trazas de metales particularmente hierro, cobre y manganeso. (REICHERT, 1949)

**Silicato de sodio:** Actúa como un detergente, facilita el acceso del peróxido a la fibra. Sirve de buffer porque entrega álcali conforme es necesitado por la reacción y debido a su propiedad de formar complejos provoca la estabilización de la solución. (PATT, 1982), (RAPHSON, 1963). La formación de películas es útil cuando las superficies de metal de tanques y tuberías son inactivadas por tal cubierta inhibiendo la corrosión (REGLA, 1979). Con el sulfato de magnesio reacciona formando una suspensión coloidal de sulfato de magnesio el cual protege el ión hidroxilo contra la degradación o destrucción de iones metálicos.

#### **1.4.7.6. Condiciones para el blanqueo con peróxido**

##### **Adición de reactivo**

Un incremento en el nivel de peróxido resultará un incremento en la blancura (HOOK, 1975), (PATT, 1982)

Esta es una variable que depende de la naturaleza de la pulpa, del grado de blancura deseado, así como del resto de parámetros de blanqueo. Los porcentajes comprendidos entre el 1 y 2 % son industrialmente utilizados y al final debe permanecer un remanente del 10 al 20% del peróxido inicial con el fin de evitar el riesgo de amarillamiento de la pulpa por efecto del álcali sobre los carbohidratos. (CACERES ROJAS, 1983), (REGLA, 1979).

### **Consistencia**

El efecto del incremento de la consistencia elevará la eficiencia de la reacción de blanqueo además se aumenta la ganancia en blancura para una misma cantidad de reactivo aplicado (RYDHOLM, 1985). El uso de consistencias altas se recomienda por varias razones: Aumenta la concentración de iones  $\text{HOO}^-$ , ahorra energía y volumen. Industrialmente, la consistencia es óptima entre 18 y 22% b.p.s; y en el laboratorio esta va de 4 a 8% debido a que es difícil lograr una homogenización de la suspensión de la pulpa. (CACERES ROJAS, 1983), (REGLA, 1979).

### **pH**

La velocidad del blanqueo está gobernada por el pH del sistema, este puede ser ajustado por la adición de hidróxido de sodio y silicato de sodio; pero este incremento también incrementa la reversión del color. La práctica predice que el nivel de pH óptimo es aproximadamente 10.5. Hay un límite superior de pH debido a la reacción secundaria, no reversible, que se favorece cuando existe un pH demasiado alcalino



provocando la aparición de cuerpos coloreados que destruyen los iones  $\text{HOO}^-$ , agentes blanqueantes, y por lo tanto debe evitarse la aparición de estos cuerpos. (CACERES ROJAS, 1983; RAPHSON, 1963)

Si el pH permanece alto al final de la etapa puede ocurrir una reversión de la blancura, y si el pH es muy bajo se disminuye la presencia del ión perhidroxilo teniendo un efecto blanqueante bajo.

### **Temperatura**

Con la elevación de la temperatura se incrementa tanto la velocidad de las reacciones de blanqueo como las de reversión, por lo que el ajuste de la temperatura es indispensable para tener una respuesta adecuada en el blanqueo. Otro efecto de la alta temperatura es que favorece la descomposición del peróxido (RYDHOLM, 1985).

Se consideran como valores óptimos el rango entre 40 y 60°C. Para valores bajos de temperatura se necesitan tiempos largos y para altos se necesita un control especial de la temperatura y la concentración del peróxido.

### **Tiempo de reacción**

El tiempo de blanqueo es dependiente de casi todas las variables del proceso, además de la naturaleza de la pulpa a blanquear. Frecuentemente oscila entre 1 y 4 horas, teniendo en cuenta que al final debe permanecer un remanente de peróxido. (RAPHSON, 1981; RYDHOLM, 1985)

### **Dureza del agua**

Es difícil especificar los requerimientos de la pureza del agua pero esta debe tener poca materia orgánica, polvo e iones metálicos pesados. El agua destilada no es apropiada puesto que la presencia de cierta dureza mejora la estabilidad del peróxido. (REGLA, 1979; CACERES ROJAS, 1983)

#### 1.4.7.7. Bórax

El bórax (tetraborato de sodio hidratado) es un importante componente poli boratado. En solución acuosa alcalina el bórax forma un sistema en equilibrio dependiente del pH con otros componentes boratos. En solución diluida ocurre rápidamente la depolimerización, de esta manera la especie mononuclear de borato ( $B(OH)_4^-$ ), junto con  $H_2O_2$ , se forma cuando el bórax se disuelve en solución acuosa. Incrementando las concentraciones de peróxido ( $H_2O_2$ ) y/o incrementando el pH lleva a peroxiboratos (Peroxoboratos) monoméricos. El equilibrio formando es bastante rápido; el  $H_2O_2$  o su anión predominará en sistemas acuosos diluidos, y de esta manera es responsable de la mayor parte de la actividad oxidante, pero hay indicaciones que las especies de peroxiborato se adhieren a la reactividad como grupos funcionales de oxidantes o agentes blanqueadores. Una explicación es que este equilibrio tiene la capacidad de colocar el anión de peroxidrilo ( $HO_2^-$ ) a un pH más bajo, que está usualmente disponible (pKa para  $H_2O_2$  es aprox. 11,6), dando una ventaja en oxidaciones nucleofílicas.

Se ha sugerido que el límite de brillantez de las pulpas de alto rendimiento puede ser debido al acceso limitado del peróxido de hidrógeno a los cromóforos en los procesos de blanqueo convencional y se ha determinado que aproximadamente el 60% de los coniferaldehídos se pueden remover durante el blanqueo con peróxido, pero la remoción completa de los coniferaldehídos se puede alcanzar cuando la lignina aislada se trata con el agente blanqueador de peróxido. Estos resultados implican que un valor más alto en la brillantez de la pulpa se podría alcanzar, usando un componente preoxigenado, si se pudiera mejorar la accesibilidad a los cromóforos. Este mejoramiento en el blanqueo podría realizarse con la adición de especies de peroxiborato.

Se sabe que los boratos forman ésteres con componentes hidroxí en ambientes acuosos. Los dioles próximos presentes en carbohidratos pueden formar un buen número de complejos ternarios reversibles con peróxido de hidrógeno y borato en ambientes acuosos alcalinos. Se cree que esta movilidad relativa del peroxiborato conduce a un incremento de la capacidad de blanqueo y a una mayor retención de los componentes de blanqueo. Se ha supuesto que una vez un éster de peroxiborato ha oxidado un cromóforo en un sitio, la reversibilidad de la formación del complejo peroxiborato-carbohidratado permitiría la migración de las especies de peroxiborato a un nuevo sitio en el complejo lignocelulósico. La regeneración del grupo peroxiborato a través de la reacción con tres iones libres de peróxido de hidrógeno o perhidroxilo en solución, o por parejas de reacciones de oxidoreducción en la matriz de fibra, permite la interacción con una destrucción oxidativa subsiguiente u otros grupos cromóforos en la lignina. Esta teoría ayuda a explicar la ventaja potencial de la adición de compuestos de peroxiborato durante el blanqueo de peróxido de pulpas mecánicas. (ARGYROPOULOS, 2002)

## **1.5. EVALUACIÓN DE PULPAS**

Las pulpas y el papel se sujetan a muchas pruebas mientras están en su proceso de manufactura. Todas estas operaciones se hacen como un esfuerzo para elaborar un producto final uniforme. Dichas pruebas se inician con el análisis de los licores que se usan para cocer el material fibroso (T604, T624, T625, T629, T641) y continúan a través de todo el proceso de fabricación. El número de kappa (T236) se utiliza para indicar el grado de cocción de la pulpa y la cantidad de reactivos de blanqueo que habrán de necesitarse. En la planta de blanqueo se hacen pruebas para determinar el

pH, la blancura (T217 y T218) y la cantidad residual de agente de blanqueo que existe en cada etapa.

### **1.5.1. Evaluación de la resistencia**

La resistencia es una de las principales características por medir en una pulpa, debido a que la unión entre fibras es precisamente tan importante como la resistencia de la fibra individual; la pulpa debe convertirse en hojas de papel antes de que pueda ser probada. Las pruebas que más comúnmente se realizan son: peso base, calibre, resistencia a la explosión, resistencia al rasgado, resistencia al doblez, y resistencia a la tensión. También es necesario medir el freeness de las muestras de pasta tomadas del aparato refinador del laboratorio, a intervalos sucesivos de batido. Los procedimientos para determinar la resistencia de la pulpa están cubiertos por los métodos TAPPI (T200, T205, T220, T221, T224, T225, T227, T231).

**Contenido de humedad:** El contenido de humedad es variable, por lo que es necesario conocerlo para referir los resultados a peso seco. Se utiliza una estufa Memmert con regulador de temperatura y la prueba se realiza bajo la norma ICONTEC 727. (ASENJO, 1979; CACERES, 1979)

**Batido:** Consiste en efectuar una acción mecánica sobre las fibras cuando estas se encuentran en una suspensión de agua. En esta acción se le imparten propiedades a la fibra, que determinan el carácter del producto.

Las fibras absorben agua y se hinchan, lo cual origina, además, un debilitamiento de las fuerzas de cohesión entre las fibrilas. La acción mecánica produce una fibrilación, aumentándose al mismo tiempo el área de contacto entre las fibras y la flexibilidad plástica y elástica. Se usa una batidora holandesa o Valley Beater Laboratory Equipment. La operación se

realiza bajo la norma ICONTEC 687. (ASENJO, 1979; CACERES, 1978; GARCIA, 1965)

**Freeness:** Es una medida de la facilidad con la cual drena el agua libremente de una pulpa. Se expresa en cc. Representa una forma de conocer características de calidad de la fibra producida, debido a que el freeness depende de la longitud y la superficie específica de la fibra (ASENJO, 1979). Se utiliza un Canadian Standard Freeness (CSF). y la prueba se lleva a cabo bajo la norma ICONTEC 691.

## **1.5.2. Pruebas físicas**

### **1.5.2.1. Peso base**

El peso base se expresa como el peso por unidad de área superficial del papel ( $\text{g/m}^2$ ). El peso base y el espesor son probablemente las características del papel que se miden con mayor frecuencia (T410). Casi todos los papeles se venden bajo un peso base especificado. El espesor o calibre se mide en un micrómetro (Figura 13) que lee en fracciones de pulgadas o milímetros (T411). La voluminosidad del papel se determina midiendo el espesor de un apilamiento de papel (T426) y posteriormente se reporta como el espesor promedio por hoja o como el número de hojas necesarias para dar un peso de 1 pl. (ASENJO, 1979; CACERES, 1978)

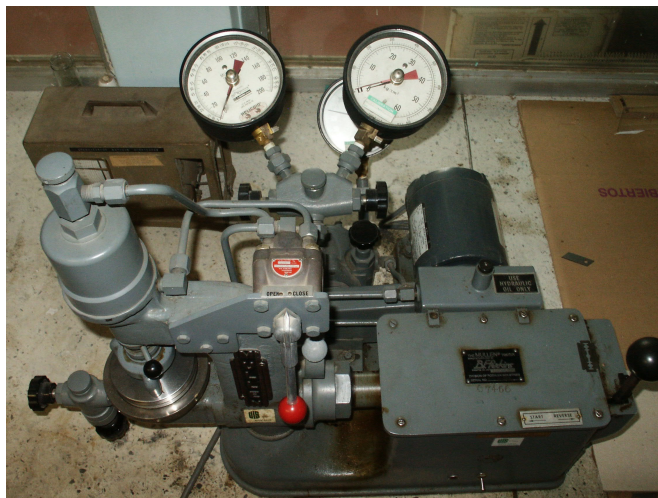


**Figura 13. Micrómetro**

## **Pruebas de Resistencia**

### **1.5.2.2. Resistencia a la explosión**

Medida con un probador Mullen, es la propiedad de resistencia que se determina con mayor frecuencia. La propiedad medida es una combinación de la tensión y de la elongación del papel. Se define como la presión hidrostática en  $\text{Kpa/m}^2$  requerida para producir la ruptura de un material, cuando la presión se incrementa a una razón constante y controlada desde un diafragma de hule hacia un área circular. Las pruebas de resistencia a la explosión se afectan por el contenido de humedad del papel y deben hacerse bajo condiciones controladas de humedad relativa, obteniéndose la máxima resistencia a la explosión a una humedad relativa de 35 a 40%, pero la diferencia hasta 50% no es muy grande. Y por encima de 50% el valor decrece. La resistencia ala explosión se mide en un Mullen Tester (Figura 14). (ASENJO, 1979; CACERES, 1978)



**Figura 14. Medidor de la resistencia a la explosión Mullen Tester**

### **1.5.2.3. Resistencia a la tensión**

Es una medida de la resistencia del papel sometido a un esfuerzo directo de tracción. Se define como la fuerza necesaria para romper una tira de papel de una longitud especificada y de una anchura de 15 mm. La resistencia a la tensión y la elongación al momento de la ruptura se miden simultáneamente en la mayoría de los probadores de tensión. El equipo utilizado es un Tensiómetro TMI (Chopper) (Figura 15) y la prueba se efectúa bajo la norma ICONTEC 782. (ASENJO, 1979; CACERES, 1978)



**Figura 15. Tensiómetro TMI (Chopper)**

#### **1.5.2.4. Resistencia al rasgado**

Es la fuerza requerida para continuar el rasgado iniciado en una hoja de papel y es de las características mecánicas que presenta una dependencia mayor con la longitud de fibra, (ASENJO MARTÍNEZ Y CÁCERES LILIA). Se mide con un probador Elmendorf Tearing Tester (Figura 16). Es otra prueba de resistencia que combina muchas características en una medición debido a que al rasgarse la hoja las fibras se deben romper o separar de las uniones interfibrilares. (ASENJO, 1979; CACERES, 1978)



**Figura 16. Probador Elmendorf Tearing Tester**

#### **1.5.2.5. Resistencia al dobléz**

Es probablemente una de las menos comprendidas de todas las pruebas de resistencia que se le hacen al papel, está diseñada para indicar la resistencia a los dobleces repetidos. No mide la tendencia del papel a quebrarse después de un solo dobléz. La prueba de resistencia al dobléz es muy sensible a los cambios de humedad relativa. Normalmente hay un gran aumento en resistencia al dobléz con cualquier incremento apreciable de humedad relativa. Sin embargo esto varía considerablemente con los diferentes tipos de papel.

El estudio de las pruebas de resistencia en grupo puede algunas veces ser muy valioso. Por ejemplo, una alta resistencia al rasgado, acompañada de altas resistencias al dobléz y a la explosión, usualmente indica una pasta larga y "lenta", preparada a partir de una pulpa resistente. Si la alta

resistencia al rasgado está acompañada por bajas resistencias al dobléz y a la explosión, esto es indicación de que se uso una pasta larga y “libre”. Si se tienen altas resistencias al dobléz y la explosión, junto con una baja resistencia al rasgado, por lo general es indicación de que la pasta está bien hidratada pero que se ha cortado. La resistencia al dobléz se mide en el probador Folding Endurance Tester (Figura 17). (ASENJO, 1979; CACERES, 1978).



**Figura 17. Probador Folding Endurance Tester**

### **1.5.3. Pruebas químicas**

#### **1.5.3.1. Contenido de lignina**

El contenido de lignina de las pulpas sin blanquear se puede determinar ya sea por mediciones directas en la que la fracción que no es lignina de la pulpa se disuelve en  $H_2SO_4$  al 72% (T222) o bien por mediciones indirectas tales como el número de permanganato (T214), el número de kappa (T236) y

el número de cloro de roe (T202). Tanto el número de permanganato como el número de kappa se determinan oxidando la lignina de la pulpa en condiciones controladas, con ácido sulfúrico y un exceso de permanganato de potasio. Después de un tiempo especificado, la reacción se interrumpe agregando KI, y la cantidad de permanganato en exceso se determina por titulación del yodo libre formado.

Tanto el número de permanganato como el de kappa representan el número de mililitros de  $\text{KMnO}_4$  0,1 N absorbidos por un gramo de pulpa libre de humedad.

En la determinación del número kappa se usan 100 ml de  $\text{KMnO}_4$  0.1N, y la cantidad de pulpa tratada se varía hasta tener un consumo de  $\text{KMnO}_4$  entre 30 y 70 ml. (ASENJO, 1979; CACERES, 1978)

#### **1.5.4. Pruebas ópticas**

El color (T442), la blancura (T452), la opacidad (T425) y el brillo (T424) son las principales pruebas ópticas que se efectúan en el papel, tienen gran importancia en los papeles de impresión y escritura y vienen determinadas por la forma en que este refleja, transmite o absorbe la luz que incide sobre él.

##### **1.5.4.1. Color y blancura**

El color es otra característica importante de la pulpa. La medición más comúnmente utilizada no es una medición verdadera del color sino de la cantidad de amarillez en la pulpa. Se mide a una longitud efectiva de onda de  $457\text{m}\mu$  es decir la zona azul del espectro y se reporta como blancura TAPPI que se usa principalmente para medir la efectividad del blanqueo de las pulpas. Antes de la prueba la pulpa se debe convertir en hojas hechas a

mano. Para evitar la reversión del color las hojas se deben secar sin calor excesivo. En los métodos TAPPI T216, T217 y T218 se dan los procedimientos detallados para las mediciones de blancura y color.

#### **1.5.5. Medición de la blancura**

El blanqueo trae como consecuencia un cambio en las propiedades ópticas de la pulpa: absorción, dispersión y reflexión de la luz, expresado en términos de blancura, color u opacidad. El valor práctico más importante para caracterizar el tono de una pulpa es su brillantez, la cual puede establecerse de varias maneras, utilizando algunos puntos de referencia. El valor más utilizado es el factor de reflectancia de la luz azul (457 nm) de una hoja de pulpa, basada en la reflexión del óxido de magnesio, que se considera como 100% de blancura. La blancura es medida en el repho (Figura 18.). (SAN JUAN, 1997)



**Figura 18. El Repho**

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1. MATERIA PRIMA**

La materia prima fue suministrada y entregada en la sede de CICELPA (Bucaramanga), por la empresa Palmas del Cesar (San Alberto). Las hojas fueron cortadas en el momento de retirar el fruto de la palma y posteriormente le fueron quitados los folíolos.

Se tomaron 2630 Kg. de raquis para tener una cantidad representativa del residuo vegetal.

### **2.2. CARACTERIZACIÓN Y ADECUACIÓN DEL RAQUIS**

Se tomaron 50 raquis aleatoriamente para determinar su peso, para tener una medida de la cantidad de materia prima disponible, con base en el número de hojas producidas por cada palma. Los raquis fueron astillados y molidos en un desintegrador y picador de cuchillas y martillos marca Cremasco con motor a gasolina de 16HP y cribas de 2cm y 1cm. El material molido fue secado al sol y cribado en tamices de 0,67, 0,42 y 0,17 cm. (Figura 19) consecutivamente para extraer la mayor cantidad de parénquima, residuo que consume reactivos y disminuye el rendimiento. Para el proceso se tomó el material que fue retenido en el tamiz de 0,67cm. El material seleccionado se llevó a una humedad aproximada de 10% para evitar la degradación. (Norma T18m-59) y fue empacado en bolsas de ensilaje para conservar la humedad constante.



**Figura 19. Pulpa y fibra de hoja de palma africana**

## **2.3. PROCESO DE PULPAJE A LA SODA FRÍA**

### **2.3.1. Etapa Química**

El proceso de digestión en el presente trabajo fue a la soda en frío. Se llevaron a cabo 4 cocciones utilizando en cada una 2500 g (b.p.s.) (base pulpa seca) aproximadamente. La metodología empleada consistió en colocar el material fibroso en un digestor (tanque de acero inoxidable) de capacidad de 50 l. y añadir luego el licor de cocción compuesto por 15 % de NaOH. La relación sólido líquido (hidromódulo) utilizada fue de 1:8 y se ajustó agregando la cantidad de agua necesaria.

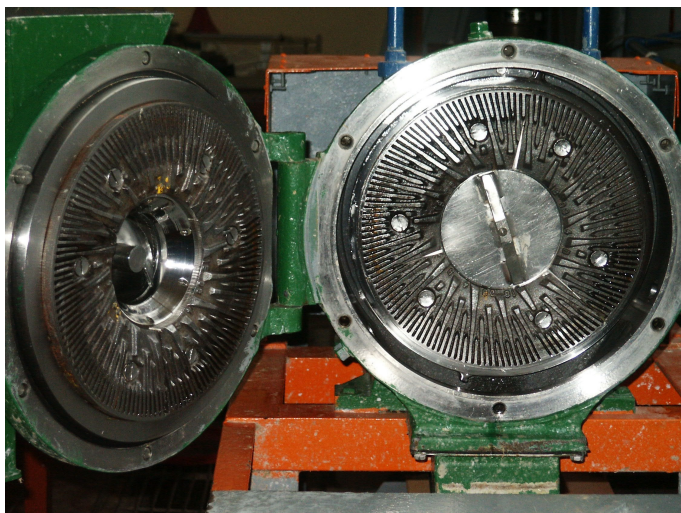
Las digestiones se llevaron a cabo humectando previamente la fibra con agua del proceso y luego adicionando la cantidad de soda respectiva, con el remanente del agua para completar el hidromódulo. La prehidratación se hizo con el fin de facilitar la circulación del licor de cocción entre los conductos capilares de las fibras.

Terminado el proceso de mezcla entre el licor de cocción y las fibras se llevó el tanque a la estufa hasta una temperatura máxima de  $96 \pm 2^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica (680 mmHg), agitando cada 30 minutos y se controló la temperatura. Una vez transcurrido el tiempo de cocción se suspendió el calentamiento, se tomó el pH del licor y se dejó en reposo durante 12 horas antes de retirar el licor de la pulpa con el fin de extraer taninos, gomas, mucílagos, sales y carbohidratos solubles en agua caliente presentes en la fibra los cuales afectan el rendimiento y consumen reactivos.

Los parámetros de las digestiones se tomaron de las mejores condiciones obtenidas en un trabajo de investigación desarrollado en CICELPA para la misma materia prima (VALDIVIESO, 2003).

### **2.3.2. Etapa Mecánica**

La pulpa después de dejarla enfriar, se lavó y se desfibró en un equipo marca SPROUT WALDRON de discos (Figura 20), con separaciones entre estos de 200,150 y 100 milésimas de pulgada para lograr un material en el cual las fibras se separaran fácilmente. Se lavó la pulpa con abundante agua para eliminar toda presencia de soda y se determinó el rendimiento.



**Figura 20. Refinador de discos Sprout Waldron**

#### **2.4. BLANQUEO**

Inicialmente se había planteado un blanqueo con perborato en una sola etapa, sin embargo debido a la coloración inicial de la pulpa se replanteó un blanqueo en dos etapas: una etapa inicial de con hipoclorito para lograr una mejor blancura final en la pulpa, seguida de una segunda etapa con perborato. Para los ensayos de blanqueo se utilizaron ocho muestras; una con la etapa de solo hipoclorito de sodio para obtener una pulpa que sirviera como referencia para luego comparar las propiedades físico-mecánicas y ópticas con los diferentes porcentajes de perborato agregado en la segunda etapa.

Las demás pulpas del proceso de blanqueo se trabajaron en dos etapas: una etapa preliminar con hipoclorito de sodio, seguida de un lavado para eliminar las sustancias que se solubilizan y el hipoclorito residual. La segunda etapa se realizó con perborato (peróxido de hidrógeno y Bórax).

#### **2.4.1. 1ª ETAPA: blanqueo con hipoclorito de sodio**

El blanqueo se llevó cabo en bolsas de ensilaje selladas, en un baño de agua a 46°C y durante el proceso se controló el pH y la temperatura a intervalos de tiempo determinados. Las condiciones para la primera etapa se tomaron constantes para todos los blanqueos; el porcentaje de hipoclorito se determinó previamente realizando 5 ensayos cada uno con 20 g (b.p.s) y variando el porcentaje de hipoclorito entre 10, 15, 20, 25, y 30% obteniendo los mejores resultados con 25% de hipoclorito, lo cual nos da una idea del cloro activo requerido. Las condiciones fueron las siguientes:

Porcentaje de Hipoclorito de Sodio = 25% en b.p.s

Porcentaje de Hidróxido de Sodio = 3% en b.p.s

La consistencia para todos los blanqueos fue del 5%.

Las pulpas antes de los blanqueos se pasaron por la pila holandesa durante 10 minutos para homogenizar la fibra, separarla y permitir un blanqueo más eficiente.

#### **2.4.2. 2ª ETAPA: blanqueo con perborato**

Esta etapa de blanqueo se llevó a cabo directamente en el tanque a una temperatura de 75°C a presión atmosférica (680 mmHg) y consistencia de 5%, siguiendo la siguiente metodología: se adicionó agua a la pulpa y se dejó que la temperatura se estabilizara, se adicionó DTPA (0,2%) hasta estabilizar la temperatura, a los 10 minutos se agregó una solución de silicato de sodio (3%), sulfato de magnesio (0,05%) y NaOH (1,5%), se homogenizó y se dejó reaccionar durante 10 minutos hasta obtener un pH óptimo de 10.5; antes de agregar el peróxido de hidrógeno, se mezcló nuevamente y a los 10 minutos se adicionó el bórax para iniciar la reacción de perborato in situ.

Durante el proceso con peróxido se controló la temperatura y el pH, se homogenizó la pulpa constantemente y se evaluó el peróxido residual cada hora. Al terminar el tiempo de reacción se retiró la pulpa del tanque y se agregó agua fría para detener las reacciones de blanqueo, posteriormente se mezcló con una solución de bisulfito de sodio hasta pH 5 para estabilizar las reacciones. Por último se determinó el rendimiento de la etapa.

Las diferentes condiciones de trabajo utilizadas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6. Condiciones utilizadas en el blanqueo con perborato.**

<b>Pulpa</b>	<b>Relación Peróxido-Bórax (%)</b>	<b>Tiempo de reacción (h)</b>
P1	1,5 – 3,0	2
P2	3,0 – 3,0	2
P3	3,0 – 1,5	2
P4	1,5 – 3,0	3
P5	3,0 – 3,0	3
P6	3,0 – 1,5	3

Pulpa 7: Pulpa con una sola etapa de blanqueo de Hipoclorito

Pulpa 8: Pulpa con ninguna etapa de blanqueo (pulpa magra)

Pulpa 9: Pulpa con dos etapas de blanqueo H-P (sin adición de bórax)

## **2.5. BATIDO O REFINADO DE LA PULPA**

Se determinó la humedad de la pulpa a refinar (blanqueada y no blanqueada). Esta medida es necesaria para poder calcular con exactitud la consistencia de la pasta en la holandesa.

Conocida la humedad de la fibra se llevó a cabo el proceso de refino en el refinador tipo holandesa Valley Beater (Ver figura 21) con 360 g (b.p.s) y 23 l de agua, consistencia de 1,67%. El proceso de refino se llevó a cabo teniendo en cuenta la norma ICONTEC 687.



**Figura 21. Refinador tipo Pila Holandesa Valley Beater**

Se controló el grado de refino o grado de drenaje de la pulpa mediante la norma T227m-58, que determina el método para medir la mayor o menor facilidad con que el agua se separa de la pulpa.

Se tomaron puntos de refino a 400, 350, 300 y 250 CSF (Canadian Standard Freeness) por ser los puntos entre los cuales se encuentran las mejores propiedades para la elaboración de papel y permitir hacer gráficas del valor del freeness contra cada una de las propiedades de resistencia.

Se elaboraron las hojas de prueba de acuerdo a la norma NTC 690, con cada muestra y se determinaron los resultados para las propiedades físico-mecánicas de las pulpas: con 24 h de acondicionamiento a 50% HR y 23°C (NTC 333, T 402 m49).

## 2.6. EVALUACIÓN DE PULPAS

### 2.6.1. Propiedades Físico-mecánicas y ópticas

La caracterización de éstas propiedades se efectuaron empleando los métodos descritos por la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de los Estados Unidos, TAPPI y especificados en la siguiente tabla:

**Tabla 7. Normas TAPPI utilizadas para la evaluación de pulpas.**

PRUEBA	NORMA
Peso base	T410 os-68
Espesor o Calibre	T411 os-76
Corte de hojas	T220 m-53
Resistencia al Estallido	T403 ts-63
Resistencia a la Tensión	T404 ts-66
Resistencia al Rasgado	T414 ts-65
Resistencia al dobléz	T423 su-68
Blancura El Repho	T452 m-58

### 2.6.2. Prueba de envejecimiento

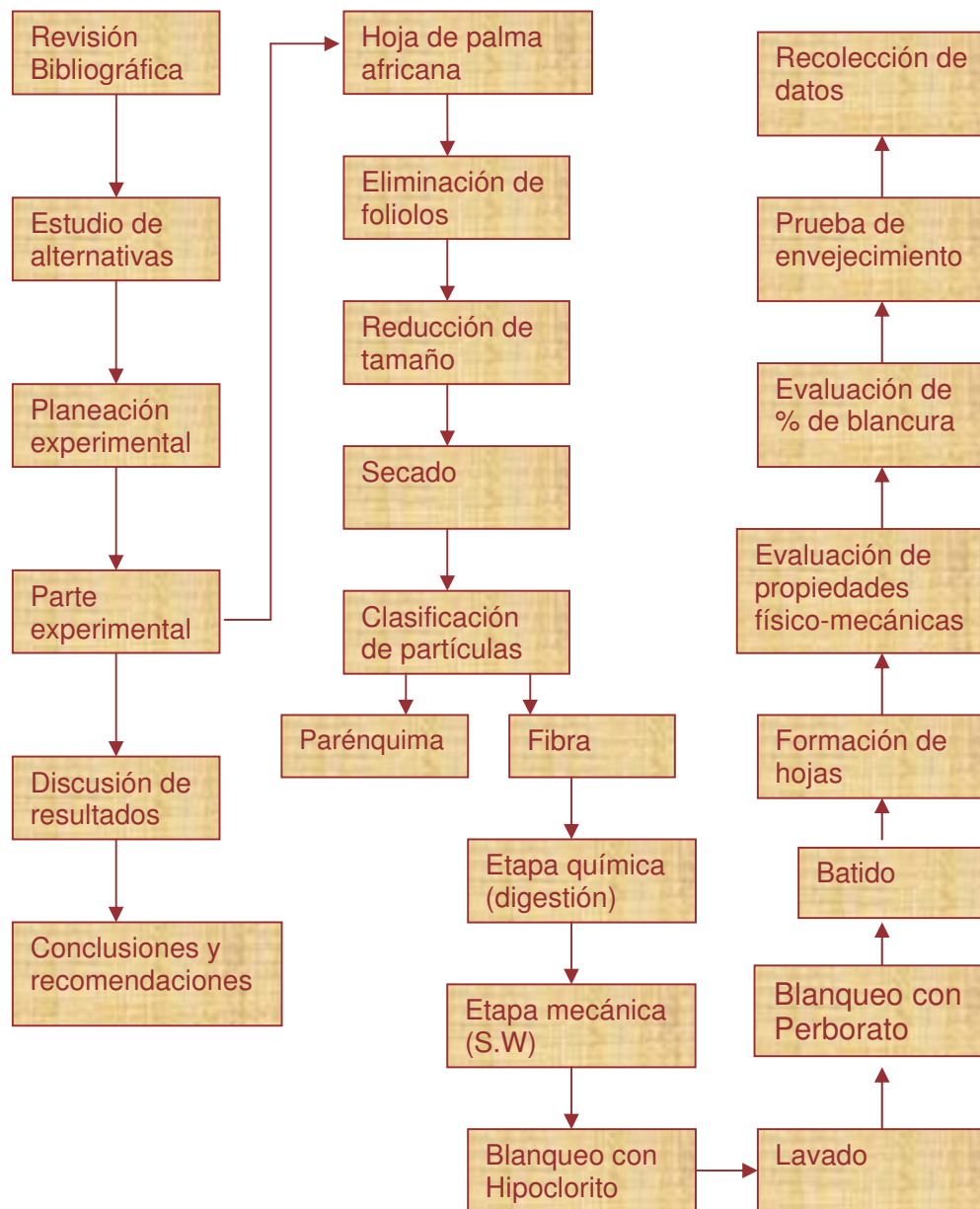
Las hojas para la determinación de las propiedades ópticas fueron formadas de acuerdo a la norma ICNTC 781, se secaron a temperatura ambiente y se determinó la blancura en el Repho. Inmediatamente se introdujeron en un horno a  $80 \pm 2$  °C durante 24, 48 y 72 horas, midiendo la pérdida de blancura a cada uno de éstos tiempos (Figura 22).

Después de esta prueba se introdujeron las muestras en un cuarto oscuro a temperatura ambiente durante un mes con el objeto de medir la reversión del color en las muestras.



**Figura 22. Prueba de envejecimiento**

## DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL TRABAJO



**Figura 23. Diagrama de bloques de la metodología empleada.**

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. MATERIA PRIMA

Se partió de una materia prima que fue previamente astillada, molida, cribada y tamizada con mallas de 0,67; 0,42 y 0,17 cm. respectivamente para separar la fibra del parénquima.

El material fibroso se almacenó en bolsas de ensilaje con una humedad del 12% y para los procesos de pulpaje se utilizó la muestra que pasó el tamiz de 0.67 cm.

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos del análisis químico del material utilizado, comparado con los reportados por la literatura para el bagazo de caña de azúcar.

**Tabla 8. Comparación del análisis químico de la palma africana y bagazo de caña**

<i>DETERMINACION</i>	<i>PALMA AFRICANA *</i>	<i>BAGAZO DE CAÑA*</i>
Solubles en NaOH 1%	30,06	34,90
Solubles en agua caliente	10,56	4,10
Solubles Alcohol- Benceno	2,03	2,80
Solubles en alcohol	3,09	-----
Lignina	12,72	20,70
Celulosa	38,01	46,60
Hemicelulosas	32,27	26,30
Cenizas	4,38	2,60

(CONTRERAS, 2001)

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla se puede decir que el material presenta un alto contenido de solubles en soda 1%, correspondiente a sustancias susceptibles a ser degradadas por ataque de hongos y microorganismos. Estos solubles corresponden a productos de degradación de gomas, hemicelulosas, lignina, resinas y productos de degradación de la celulosa. Este alto contenido de material degradable da una idea del rendimiento que se logra en un proceso semiquímico a la soda en frío como el llevado a cabo en la presente investigación. Los rendimientos de este proceso están por debajo del 70%, debido a que en el proceso se disuelve cerca del 30% de fibra inicial. En comparación con el contenido de material susceptible a ser degradado del bagazo de caña; la hoja de palma africana se sitúa entre los límites permitidos para materiales utilizados en la industria papelera.

La palma africana presenta un contenido inferior de celulosa, con respecto al bagazo de caña; pero se encuentra dentro de un límite aceptable para materias primas en la industria. La recuperación de la celulosa se puede ver favorecida por el bajo contenido de lignina presente en el material.

El contenido de lignina presente en la hoja de palma africana es muy inferior al presente en el bagazo de caña, lo que promete una posibilidad de que sea extraída mediante un proceso sencillo y más económico.

La hoja de palma africana presenta un alto contenido de hemicelulosas que favorece el proceso de refinado y las propiedades de resistencia; por ser compuestos hidrofílicos que aumentan la superficie de contacto de las fibras por la hidratación e hinchamiento que sufren en la etapa de refinado.

### 3.2. PROCESO DE PULPEO

Para el proceso de pulpaje se realizaron cinco digestiones con un porcentaje de soda de 25% y 4 horas de reacción a 96°C. Seguida de la etapa química la fibra se llevó a un refinador de discos por donde se pasó tres veces a 200, 150 y 100 milésimas de pulgada de separación entre los discos. Los rendimientos para éste proceso se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 9. Rendimientos para el proceso de pulpaje.**

COCCION	PESO PULPA b.p.s. (g)	RENDIMIENTO (%)
1	2035,8	59,9
2	2953,8	64,0
3	2687,8	70,1
4	3932,5	58,6
5	957,3	46,1

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla se aprecia que para las primeras cuatro digestiones los rendimientos son los esperados para un proceso de pulpaje semiquímico, mientras que para la última cocción se obtuvo un rendimiento notablemente menor como el esperado para un proceso químico; aunque las condiciones de operación fueron similares influye el hecho que la cantidad de fibra utilizada fue mucho menor y por ende el proceso fue más fácilmente controlable y la soda penetró mucho mejor en el material por lo que la pulpa quedó más suave y el proceso mecánico requerido para la desfibración fue más corto.

### 3.3. PROCESO DE BLANQUEO

Como ya se mencionó en la parte experimental se realizó un proceso de blanqueo en dos etapas, la primera etapa de hipoclorito y una segunda etapa con perborato, los parámetros que se conservaron constantes para todos los blanqueos fueron los siguientes:

**Tabla 10. Condiciones de operación para el proceso de blanqueo**

Etapa de Hipoclorito		Etapa de Perborato	
Condiciones			
Temperatura (°C)	50	Temperatura (°C)	75
Tiempo reacción	3 h	% MgSO <sub>4</sub>	0,05
% de hipoclorito de sodio	25	% DTPA	0,2
% de NaOH	3	% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3
Consistencia %	5	Consistencia %	5
pH inicial	≅ 12	PH inicial	≅ 10,5

Los resultados obtenidos para los diferentes blanqueos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 11. Resultados obtenidos para el proceso de blanqueo.**

Pulpa	Primera etapa			Segunda Etapa			% Rto.
	pH inicial	pH final	% Hipoclorito residual	pH inicial	pH final	% Peróxido residual	
P 1	12,3	9,5	3,52	10,5	9,9	22,66	74,42
P 2	12,2	10,1	14,20	10,5	9,9	20,40	78,40
P 3	12,5	9,5	1,39	10,8	10,1	45,00	76,88
P 4	12,3	9,6	1,11	10,8	10,1	26,56	62,82
P 5	12,3	10,0	1,14	10,8	10,6	5,66	72,14
P 6	12,3	9,4	1,14	10,6	9,8	26,56	57,66
P 7	11,1	9,7	13,63				
P 9	12,0	9,2	2,30	10,8	10,0	38,00	65,15

Para la primera etapa con hipoclorito la pulpa que reaccionó en menor grado corresponde a la pulpa 2 y las pulpas que consumieron más hipoclorito fueron las pulpas 4, 5 y 6; estos resultados concuerdan con los porcentajes de blancura expuestos en la tabla 12. En la etapa de hipoclorito de sodio fue necesario controlar el pH al final de cada hora de reacción para evitar la formación del ácido hipocloroso que ataca los carbohidratos en forma irreversible. En cuanto al porcentaje de peróxido residual determinado, se puede decir que se encuentran entre los márgenes establecidos en la literatura (20% residual) para evitar una reversión de la blancura.

**Tabla 12. Influencia de la lignina en el % de blancura en las pulpas.**

PULPA	Kappa	% lignina	% blancura iso	% deslignificación
P1	17,91	2,44	73,41	80,84
P2	21,23	2,89	72,13	77,28
P3	13,94	1,89	77,85	85,13
P4	14,82	2,02	80,53	84,21
P5	12,99	1,87	79,35	86,14
P6	13,51	1,84	81,13	85,59
P7	33,09	4,50	64,53	64,54
P8	93,51	12,72	26,11	0
P9	8,19	1,23	82,58	86,40

En primera instancia se observa en la tabla 12 un porcentaje de blancura mayor para la segunda serie de pulpas blanqueadas con perborato (pulpas 4, 5 y 6) en comparación con la primera serie de pulpas (pulpas 1, 2 y 3); esta diferencia es debida fundamentalmente al tiempo de reacción que fue mayor para la segunda serie de pulpas.

También se observa con base a los resultados obtenidos en las tablas 11 y 12 que el valor más bajo en porcentaje de blancura exceptuando el de la pulpa magra se registra en la pulpa 7 que es la pulpa que sólo tiene una etapa de blanqueo, y el valor más alto es para la pulpa 9 que tiene etapa de blanqueo H-P, esto se puede explicar debido a que ésta pulpa se blanqueó a partir de la pulpa que se obtuvo de la digestión 5, que tiene un proceso químico más eficiente y por consiguiente la lignina que es la responsable del color oscuro en las pulpas fue más atacada que en el resto de las cocciones, por tanto es consecuente un valor más alto de blancura para esta pulpa.

En cuanto a las pulpas blanqueadas con perborato, la mejor blancura se obtuvo para la pulpa 6 que es la pulpa que tiene 3% de peróxido, 1,5% de bórax y tiene tres horas de reacción para la segunda etapa. Estos valores también son consecuentes con el porcentaje de lignina determinado para cada pulpa, debido a que los valores más bajos de lignina corresponden a las pulpas más blancas como lo son la pulpa 6 y la pulpa 9.

### **3.4. PROCESO DE ENVEJECIMIENTO**

El proceso de envejecimiento se realizó con el fin de establecer la influencia que tenía la adición de bórax a las pulpas blanqueadas con respecto a la reversión del color. Se realizó un proceso de envejecimiento acelerado a 80°C y los datos obtenidos se muestran en la tabla 13:

**Tabla 13. Datos obtenidos para la prueba de envejecimiento.**

% REVERSIÓN					
PULPA	24 H	48 H	72 H	15 DIAS	30 DIAS
P1	2,43	3,68	4,38	5,76	6,08
P2	3,14	4,40	5,08	6,45	6,81
P3	3,66	4,49	5,79	7,11	7,42
P4	3,10	4,48	5,40	7,16	7,98
P5	2,17	3,28	4,09	5,91	6,57
P6	2,42	3,96	4,45	6,37	6,95
P7	6,64	9,04	9,86	11,04	11,49
P9	2,80	4,07	4,67	6,42	

De acuerdo a la tabla 13 la pulpa con menor grado de reversión del color o amarillamiento es la pulpa 5 que contiene 3% de peróxido y 3 % de bórax.

Para visualizar con más detalle el papel que cumplía el bórax en la reversión de color se realizó una segunda prueba de impregnación: que consistió en adicionar una solución de bórax al 3% in situ a las hojas de pulpa ya hechas, las hojas se realizaron a partir de la pulpa 9 para establecer un punto de comparación entre la pulpa con adición bórax in situ por impregnación y sin bórax. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 14. Ensayo de impregnación. Porcentaje de reversión.**

PULPA 9	Blancura inicial %	24 h	48 h	72 h
Hojas sin bórax	75,71	2,44%	3,33%	4,11%
Hojas impregnadas con bórax	74,63	1,93%	2,80%	3,43%

El experimento a escala de laboratorio que se llevó a cabo en el cual fue aplicado a las hojas una solución de bórax al 30% para comparar las características de reversión de blanqueo, demostró una mejor inhibición de la

reversión de color para las hojas impregnadas con bórax. Estos datos muestran la marcada mejoría que la adición de una pequeña cantidad de bórax tiene sobre las características de reversión del color de la pulpa y la estabilidad de la blancura a largo plazo.

### **3.5. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS**

Los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades físico-mecánicas de las diferentes pulpas a CFS de 400, 300 y 200 se muestran en la tabla 15.

#### **Pulpa morena (magra)**

Observando los resultados obtenidos en el análisis de las propiedades físico-mecánicas de tensión, explosión, doblez y rasgado para las pulpas no blanqueadas mostradas en las figuras 24, 25, 26 y 27 respectivamente; se puede determinar el siguiente comportamiento:

Al comparar las graficas de la pulpa magra después del proceso a la soda con las diferentes pulpas blanqueadas se puede notar que:

La resistencia a la tensión, doblez y explosión aumentan inicialmente con el grado de refino obteniéndose los puntos máximos a un “frenes” de 300 como se puede observar en las figuras 24, 25 y 26 debido a los efectos del proceso de golpeo, molido y fricción dentro del agua durante el proceso mecánico, que dan como resultado un aumento de la flexibilidad, hidratación y por consiguiente fibrilación (subdivisión de las fibras en fibrilas, por la hidratación ocasionada por la difusión del agua en los conductos capilares más finos y numerosos de las fibras de celulosa; favorecida por el contenido de

hemicelulosas que son compuestos hidrofílicos que ayudan a que la fibra absorba agua en mayor proporción).

**Tabla 15. Propiedades físico-mecánicas**

RESISTENCIA A LA TENSIÓN									
CSF	PULPA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
200	4950	5580	4800	6050	4850	6000	7300	5350	6050
300	4500	5100	4580	5250	4720	5800	5570	6250	5850
400	3200	4350	4200	4520	4600	4900	5180	4390	5150
RESISTENCIA A LA EXPLOSION									
CSF	PULPA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
200	41,2	49,8	41,0	46,1	38,9	50,9	61,6	56,8	52,1
300	39,5	49,2	39,0	43,2	38,5	48,4	49,8	59,3	49,6
400	37,0	38,5	36,2	37,9	39,2	41,3	52,0	42,0	44,9
RESISTENCIA AL DOBLEZ									
CSF	PULPA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
200	43	30	30	26	28	53	154	104	94
300	22	19	27	17	19	40	94	118	72
400	3	12	18	12	16	23	61	44	48
RESISTENCIA AL RASGADO									
CSF	PULPA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
200	38,0	50,0	33,5	44,5	38,5	45,0	70,0	56,8	46,3
300	47,0	62,5	37,0	41,8	44,5	55,5	61,0	54,5	48,8
400	57,0	70,0	44,5	47,0	55,0	57,0	73,2	54,0	49,6

**Nota:** Todas las pruebas realizadas para todas las pulpas evaluadas están referidas con un peso base de 60 g / m<sup>2</sup>.

Los resultados obtenidos para la resistencia al rasgado mostrados en la figura 27, muestran que para la pulpa magra esta propiedad disminuye con el grado de refino y que es afectada por el proceso de fibrilación y corte de fibras en el proceso mecánico presentando mejores resultados para pulpas más duras y sin proceso de blanqueo. Debido a que en el proceso empleado para la obtención de pulpas, la lignina presente en el material no es extraída sino modificada, las fibras están más unidas por el poder aglomerante y cementante de la lignina.

El contenido de lignina residual determinado por el número Kappa (tabla 12), indica que por la alta concentración de soda utilizada en el licor de digestión se logró una buena limpieza de la pulpa debido a la alta relación soda-fibra.

### **Pulpas blanqueadas**

El resultado de la oxidación de la lignina y modificación de los grupos cromóforos es muy similar para las seis pulpas blanqueadas en la primera etapa con hipoclorito de sodio y en la segunda con peróxido de hidrógeno y bórax como se puede observar en los resultados obtenidos para el número Kappa en la tabla 12. lográndose un porcentaje de deslignificación de 83.20% en promedio para las seis pulpas blanqueadas con peroxi-borato, siendo este un porcentaje alto comparado con el de la pulpa 7 blanqueada en una sola etapa con hipoclorito de sodio en la cual se obtuvo un porcentaje de deslignificación de 64,54%, pero inferior al de la pulpa 9 blanqueada en la segunda etapa con peróxido de hidrógeno sin utilizar bórax que fue de 86,40% (cabe destacar que esta última pulpa sufrió un proceso más químico que mecánico, ya que las demás pulpas fueron pasadas 3 veces por cada una de las tres separaciones del S.W y la pulpa nueve sólo se pasó dos veces por el S.W)

Comparando las propiedades físico- mecánicas de las pulpas blanqueadas respecto a la pulpa magra se nota que en general con el proceso de blanqueo se pierde resistencia al dobléz, tensión y explosión, además estas

propiedades caen más a medida que aumentan las etapas de blanqueo; pues comparando las muestras blanqueadas se nota que la pulpa P7 blanqueada en una sola etapa con hipoclorito de sodio presenta mejores propiedades que las que se sometieron al proceso de blanqueo en dos etapas debido al ataque a los carbohidratos durante la secuencia de blanqueo y al efecto que tiene el refino sobre las propiedades mecánicas de la pulpa como consecuencia de la fibrilación, disminución de la longitud y grosor de la fibra sobre la pulpa más limpia.

Como se esperaba observando la tabla 12 correspondiente a los resultados del porcentaje de blancura de las pulpas blanqueadas, la pulpa 9 que tiene ligeramente menor contenido de lignina Klason residual debido a que su proceso de pulpeo fue más químico que mecánico presenta el mejor porcentaje de blancura 82,58% ISO, seguida por la pulpa 6 en la que la segunda etapa de blanqueo contiene 3% de peróxido y 1,5% de bórax durante tres horas de reacción que presentó un porcentaje de 81,13% ISO.

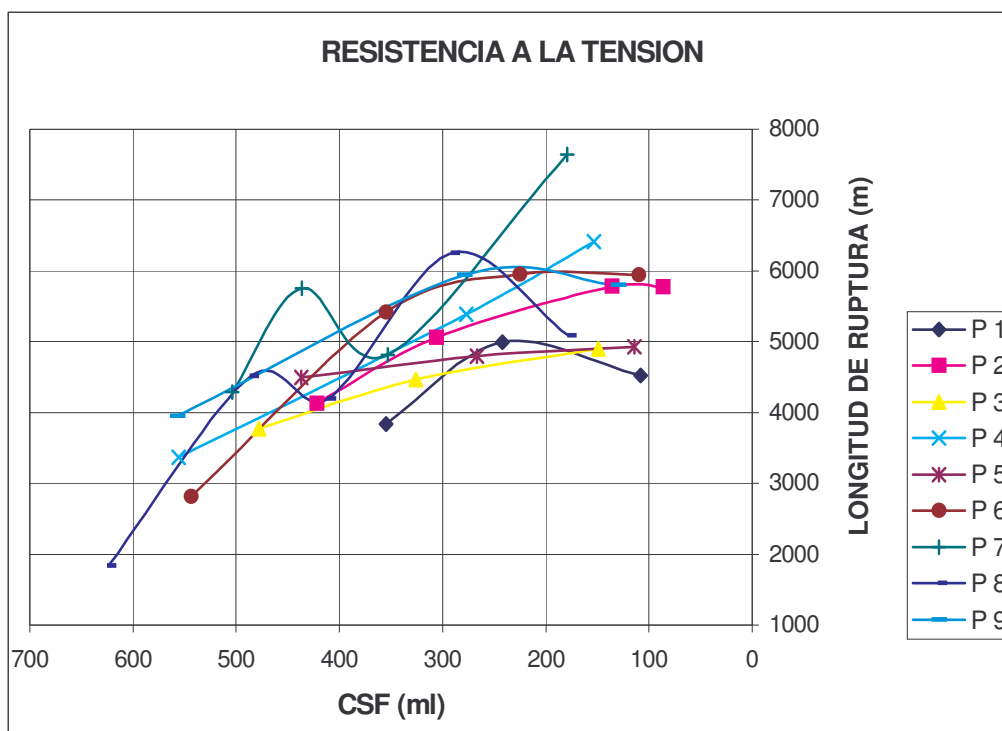
Cabe destacar que el porcentaje de blancura es afectado por el contenido de compuestos que aportan colores ajenos a la celulosa y hemicelulosas como son las gomas, resinas y lignina por lo que en la tabla 12 existen algunos porcentajes de deslignificación altos con blancuras relativamente menores.

En la tabla 16 se puede observar el efecto del refino sobre el volumen específico de la fibra. A medida que aumenta el tiempo de refino el volumen disminuye, por la fibrilación y el acortamiento de las fibras

**Tabla 16. Efecto de refino sobre el volumen específico**

Volumen específico									
CSF	PULPA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
200	1,41	1,50	1,28	1,45	1,30	1,42	1,81	1,81	1,26
300	1,54	1,59	1,30	1,50	1,45	1,58	1,62	1,79	1,30
400	1,63	1,79	1,44	1,65	1,69	1,60	1,90	1,68	1,35

### 3.5.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN



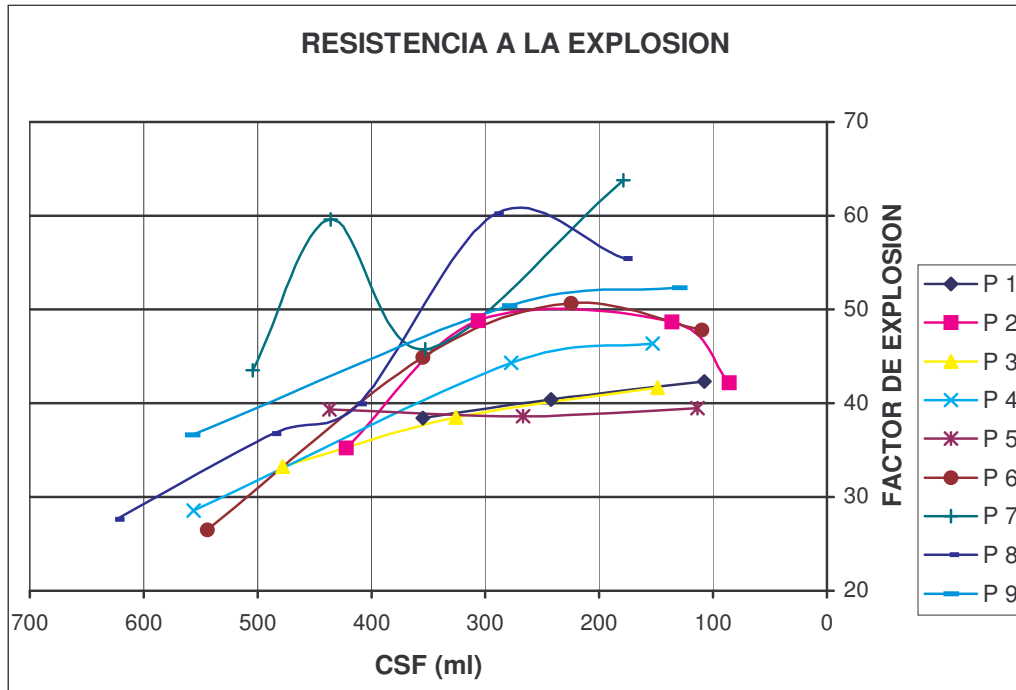
**Figura 24. Resistencia a la Tensión vs. CSF**

- ✓ La figura 24 corresponde a los resultados obtenidos para la longitud de ruptura por tracción para las 9 pulpas. La longitud de ruptura de

las pulpas aumenta al aumentar el tiempo de refino; el valor máximo obtenido para la resistencia a la tensión fue de 7610 m. (pulpa P7; CSF 179) y el valor mínimo fue de 1082 m. (pulpa P8; CSF 650).

- ✓ Se observó que de las seis pulpas blanqueadas con perborato la pulpa P6 que corresponde a la de 3% de Peróxido, 1,5% de bórax y 3 h de reacción, presentó las mejores propiedades de resistencia a la tensión para cada uno de los puntos de refino en comparación con las demás.
- ✓ La pulpa P9, correspondiente a la pulpa blanqueada con peróxido de hidrógeno al 3% durante 2 horas de reacción presentó también un buen comportamiento de resistencia a la tensión.
- ✓ La pulpa P1, correspondiente a la pulpa blanqueada con perborato al 1,5% de peróxido y 3% de bórax durante 2 horas de reacción presentó los menores valores de resistencia a la tensión.

### 3.5.2. RESISTENCIA A LA EXPLOSIÓN



**Figura 25. Resistencia a la Explosión vs. CSF**

- ✓ En la figura 25 se presentan los resultados para la evaluación del factor de explosión para las 9 pulpas trabajadas donde se observó un aumento en la propiedad a medida que el tiempo de refino es mayor.
- ✓ Los resultados de la medida del factor de resistencia a la explosión se encuentran dentro de un valor máximo de 63,8 (pulpa P7; CSF 179) y un valor mínimo de 26,5 (pulpa P6; CSF 110).
- ✓ Se observó que del total de las pulpas blanqueadas la que presentó mejor comportamiento en cada uno de los puntos de refino fue la pulpa P7 que corresponde al blanqueo hecho en una etapa con hipoclorito de sodio.

- ✓ De las 6 pulpas blanqueadas con perborato la que presentó el mejor comportamiento en cada uno de los puntos de refino en cuanto a la resistencia a la explosión fue la pulpa P6 que corresponde a la pulpa con 3% de peróxido, 1,5% de bórax y 3 h de reacción y la que presentó el comportamiento más bajo fue la pulpa P5 (3% peróxido y 3% de bórax).
- ✓ La pulpa P9, correspondiente a la pulpa blanqueada con peróxido de hidrógeno al 3% durante 2 horas de reacción presentó también un buen comportamiento de resistencia a la explosión.

### 3.5.3. RESISTENCIA AL DOBLEZ

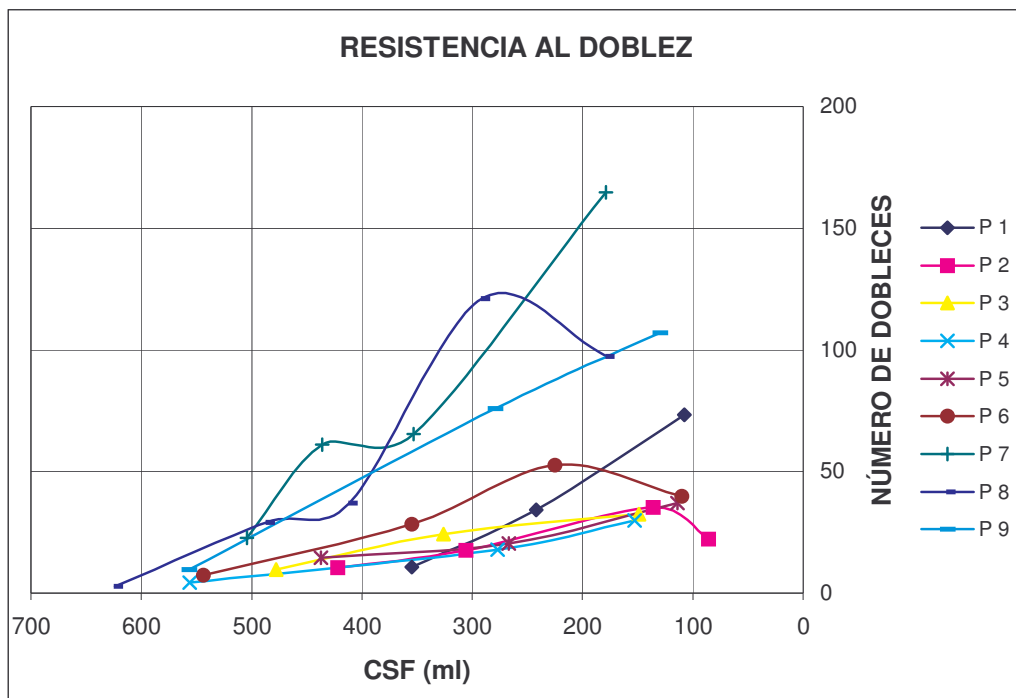
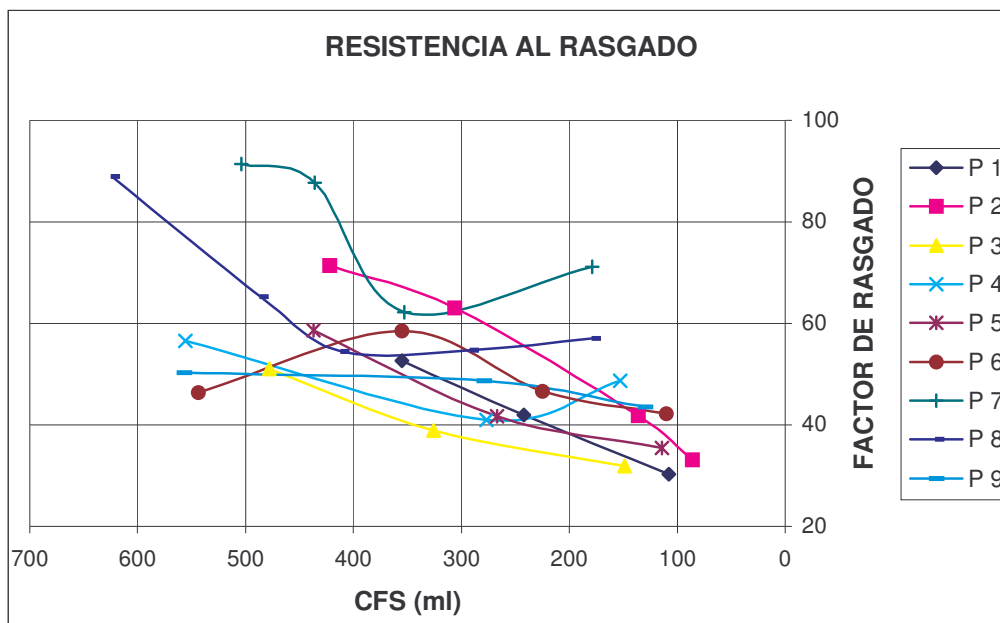


Figura 26. Resistencia al Doblez vs. CSF

- ✓ La figura 26 muestra el factor de resistencia al dobléz para las 9 pulpas trabajadas. En todas las digestiones el factor de resistencia al dobléz o plegado aumenta con el aumento en el tiempo de refino.
- ✓ Los resultados correspondientes al factor de resistencia al dobléz se encuentran entre un valor máximo de 165 (pulpa P7; CSF 179) y un valor mínimo de 4 (pulpa P8; CSF 624).
- ✓ Se observó que los valores máximos de factor de resistencia al dobléz los presentó la pulpa P7, que corresponde a la pulpa blanqueada en una etapa con hipoclorito de sodio y 3 horas de reacción.
- ✓ De las seis pulpas blanqueadas con perborato la que presenta el mejor comportamiento de resistencia al dobléz en cada uno de los grados de refino es la pulpa P6 blanqueada en la segunda etapa con 3% de Peróxido y 1,5% de Bórax durante 3 h de reacción y la del comportamiento menos eficiente es la pulpa P4 blanqueada en la segunda etapa con 1,5% de peróxido y 3% de bórax durante 3 h de reacción.
- ✓ La pulpa 9 blanqueada en la segunda etapa con solo peróxido de hidrógeno presenta mejores características de resistencia al dobléz que las 6 pulpas blanqueadas con perborato.

### 3.5.4. RESISTENCIA AL RASGADO

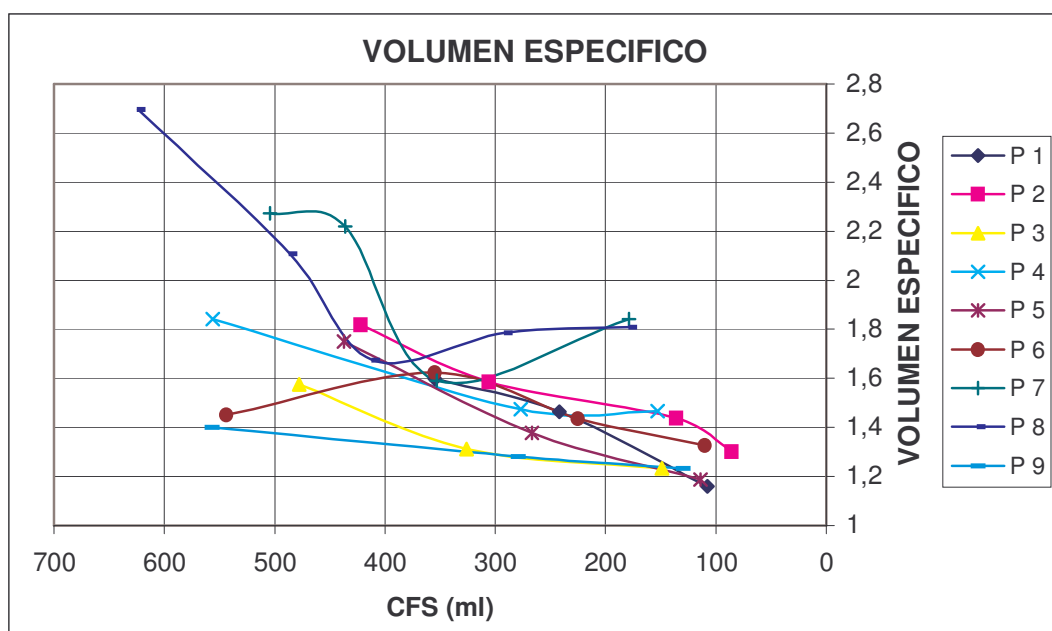


**Figura 27. Resistencia al rasgado vs. CSF**

- ✓ La figura 27 muestra los resultados obtenidos para la resistencia al rasgado. Esta propiedad contrario a las demás propiedades físico-mecánicas disminuye al aumentar en el tiempo de refino.
- ✓ El valor máximo obtenido para las 9 pulpas estudiadas fue de 91 (pulpa P7; CSF 504) y el valor mínimo 30 (pulpa P1, CSF 108)
- ✓ Se observó que del total de las pulpas trabajadas la que presentó más resistencia al rasgado fue la pulpa P7 blanqueada en una sola etapa con hipoclorito de sodio.
- ✓ De la gráfica se puede observar que de las seis pulpas blanqueadas en la segunda etapa con perborato el mejor comportamiento para cada tiempo de refino se obtuvo con la pulpa P2 (3% de peróxido y

3% de bórax con 2h de reacción) y el comportamiento más deficiente se obtuvo con la pulpa P3 (3% de peróxido y 1,5% de bórax con 3h de reacción).

### 3.5.5. VOLUMEN ESPECÍFICO



**Figura 28. Volumen específico vs. CFS**

- ✓ La figura 28 muestra los resultados obtenidos para el valor del volúmen específico según el grado de refinado. Esta propiedad disminuye al aumentar en el tiempo de refinado para las pulpas blanqueadas.
- ✓ El valor máximo obtenido para las 9 pulpas estudiadas fue de 2,70 (pulpa P8; CSF 620) y el valor mínimo 1,15 (pulpa P1, CSF 108)

## **EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DEL BLANQUEO**

Todas las tendencias modernas, en fabricas de gran volumen de producción, aplican procesos continuos, que permiten una mayor facilidad de control de las operaciones y a una homogenización del producto terminado.

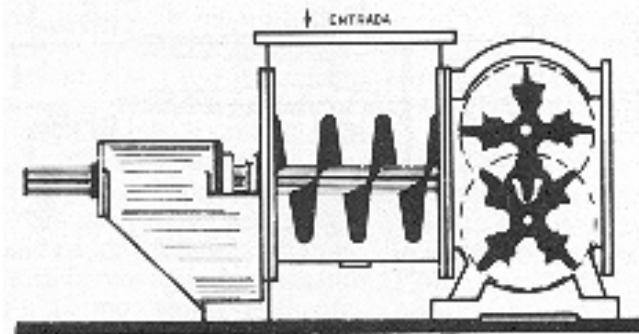
En el blanqueo por etapas cada una de las operaciones intermedias se complementa con una operación de lavado que tiende a eliminar los residuos de reactivo en exceso, antes de pasar a otros tratamientos sucesivos.

Para el blanqueamiento continuo son necesarios equipos que realicen transporte, mezcla, retención y lavado de la pasta. La mayoría de estos equipos requieren material especial para la etapa en que se están utilizando.

### **EQUIPOS PARA TRANSPORTE**

La consistencia de la pulpa a blanquear determina el medio de transporte más conveniente. Las bombas empleadas son:

- ✓ Consistencia hasta 5%: bombas centrífugas comunes.
- ✓ Consistencias de 1 a 5%: bombas de tipo “stock pump”
- ✓ Consistencias elevadas hasta 20%: bombas para alta densidad que necesitan un alimentador especial.
- ✓ Consistencias mayores a 20%: la pasta puede ser transportada neumáticamente o por esteras transportadoras



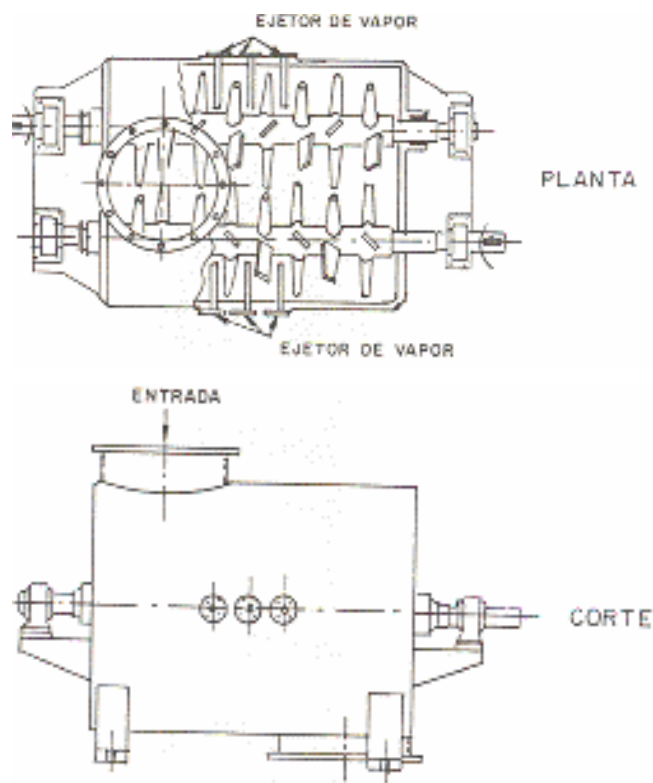
**Figura 29. Bomba de alta consistencia**

## **EQUIPO PARA MEZCLA**

La mezcla de los reactivos con la pasta debe ser rápida y uniforme para garantizar una reacción homogénea. La eficiencia de los mezcladores es un punto crítico del blanqueo; una mezcla inadecuada va a llevar a un mayor consumo de reactivos y a un ataque excesivo a determinadas fibras en tanto que otras permanecerán sin reaccionar. Existen básicamente dos modelos. El primero se refiere a los mezcladores de cloro. La cloración se efectúa en consistencias bajas; el cloro es poco soluble en agua y su reacción con la pasta es prácticamente instantánea. El cloro gaseoso es inicialmente disperso en agua para que se pueda adherir a las paredes de las fibras y posteriormente reaccionar con la lignina. Las burbujas grandes migran a la superficie desprendiéndose sin reaccionar con la lignina. El agua subpresionada pasa a través de una reducción y arrastra el cloro inyectado que es entonces disperso en pequeñas burbujas.

El otro tipo de mezcladores se utilizan en el blanqueo para pastas de mediana o alta consistencia. Como la mayoría de las reacciones de

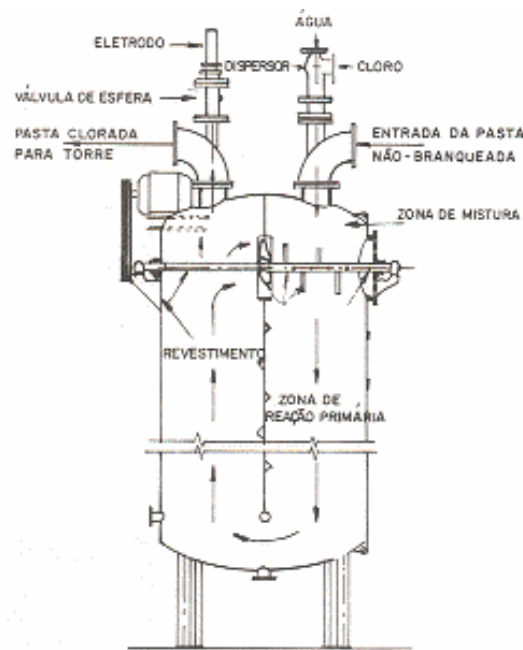
blanqueo se llevan a cabo a altas temperaturas muchas veces la pasta es mezclada simultáneamente con los agentes blanqueadores y el vapor. En la figura 30 se muestra un mezclador doble que es usado para extracción alcalina, hipocloración, peroxidación con calentamiento de la pasta antes de la etapa de dioxidación. Los rotores presionan la pasta a través del mezclador y el agente químico puede ser adicionado en la alimentación del reactor.



**Figura 30. Mezclador de alta consistencia**

Existen otros mezcladores con pre-retención figura 31. En este tipo de reactor la mezcla cloro / pasta es mantenida con una fuerte agitación producida por circulación forzada antes de ir a la torre de retención.

Los mezcladores dinámicos son destinados a las pastas con consistencia media. La suspensión de fibras es sometida a una intensa tensión de cisallamiento, donde las fibras individuales son colocadas en régimen turbulento. El gas es introducido en minúsculas burbujas sobre el mismo campo cisallante lo que lo lleva a un íntimo contacto con las fibras.



**Figura 31. Torre de Pre-retención**

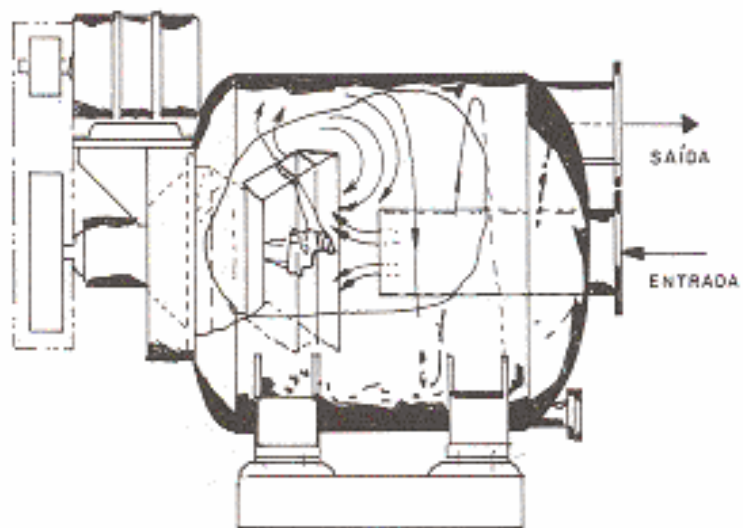


Figura 32. Mezclador de reactivos de baja consistencia

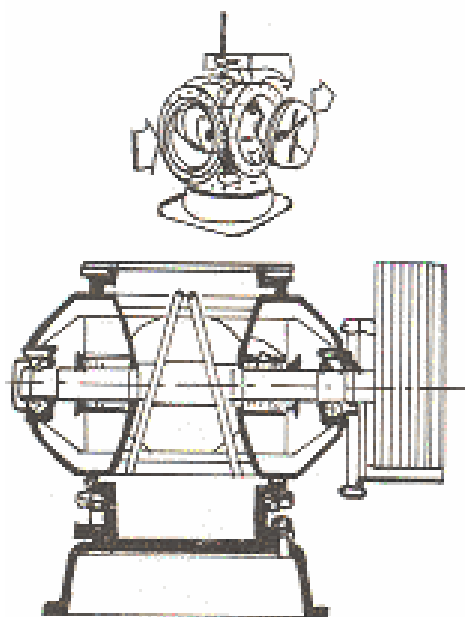
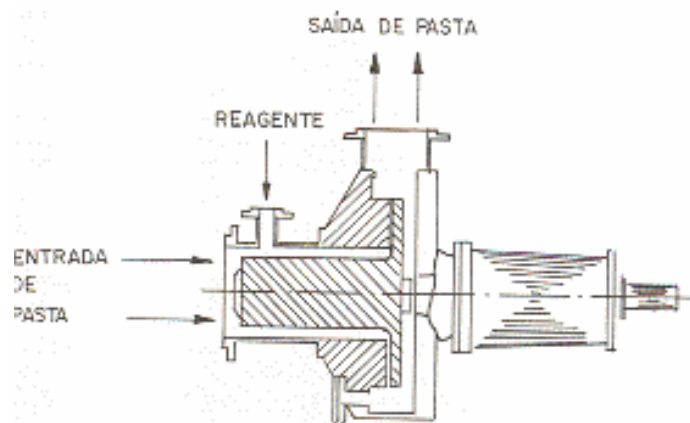


Figura 33. Mezclador de cloro externo Sund-Impco



**Figura 34. Mezclador dinámico MC**

## **EQUIPO DE RETENCIÓN**

La retención de la pasta celulósica en contacto con los agentes de blanqueo después del mezclado tiene por finalidad posibilitar la difusión completa a través de las fibras para que las reacciones se completen. En los procesos continuos las torres de retención son comúnmente empleadas pudiendo ser de flujo ascendente o descendente cuyas ventajas y limitaciones son:

### **Torres de flujo ascendente:**

- ✓ Mezcla efectuada en el fondo de la torre.
- ✓ Los reactantes entran sub-presionados.
- ✓ Su empleo es más común en consistencias bajas.
- ✓ Tiempo de retención pre-fijado.
- ✓ El volumen útil corresponde al volumen total.
- ✓ Conveniente para cloro y dióxido de cloro debido a la volatilidad de los mismos.

### Torres de flujo descendente:

- ✓ Posibilidad de controlar el tiempo de retención.
- ✓ Conveniente para altas densidades.
- ✓ El volumen efectivo corresponde a cerca del 80% del volumen total.
- ✓ Mayor probabilidad de formación de canales preferenciales y obstrucción.

Los accesorios de las torres son: duchas de dilución en el fondo de la torre, circuladores, raspadores e indicadores de interfase

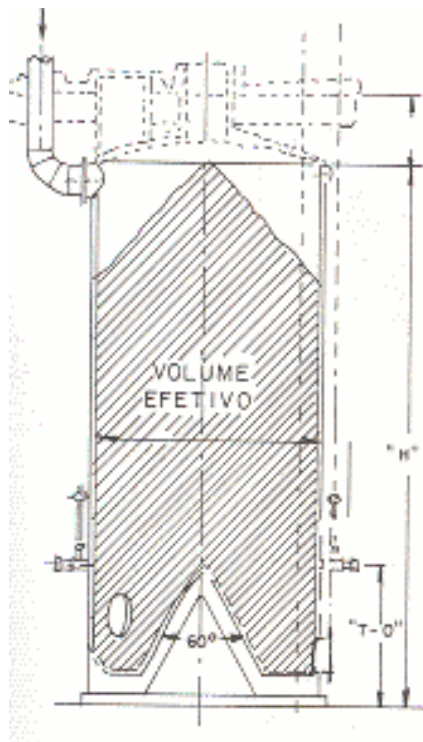


Figura 35. Torre de Alta densidad, flujo descendente.

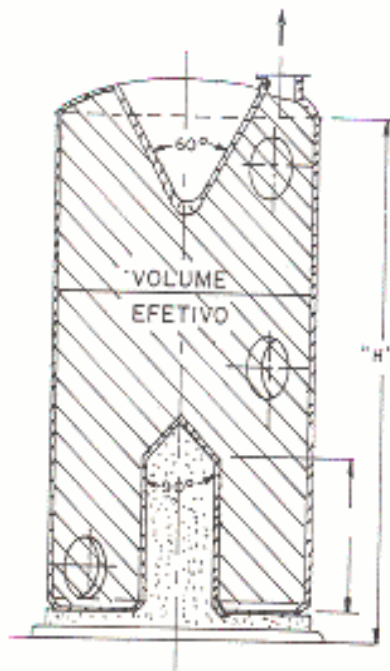


Figura 36. Torre de baja densidad, flujo ascendente.

## **EQUIPO PARA LAVADO**

Generalmente después de cada etapa de blanqueo, la pasta es lavada con la finalidad de remover los productos que se tornan solubles por acción de tratamientos anteriores.

La pasta celulósica al ser retirada de la torre, se encuentra a baja consistencia para facilitar el bombeo. El lavado sirve tanto para engrosar la pasta como para alterar la temperatura (enfriamiento o calentamiento). Existen dos mecanismos de lavado: un efecto por desplazamiento y otro por difusión.

La pasta es generalmente diluida hasta una consistencia de 0,5 a 1,5%, antes de entrar al tanque lavador. La capa que se forma sobre el tambor es lavada con agua limpia (por las duchas), entra en un engrosador y sale con consistencia de 10 a 20%.

Los principales tipos de filtros son: un tambor con filtro al vacío, lavador sin válvula y lavador de válvula periférica.

## **MATERIALES DE CONSTRUCCION**

La corrosión en el blanqueo es bastante elevada principalmente en las etapas de cloro y dióxido de cloro. El empleo de material inadecuado puede resultar en pérdidas considerables en la manutención o en la producción, siendo conveniente la utilización de aleaciones metálicas o recubrimientos que ofrezcan resistencia a la corrosión. La tendencia actual de reciclar los efluentes puede aumentar cada vez más los problemas de corrosión.

Nuevas aleaciones metálicas y recubrimientos están siendo constantemente investigados. Así para torres y tuberías los recubrimientos comúnmente utilizados son:

- ✓ Cloración: cerámica anti-ácida, goma especial (cuando no hay  $\text{ClO}_2$ ) o poliéster de resinas bifenólicas o poli vinílicas reforzadas con fibra de vidrio.
- ✓ Extracción alcalina: hoja lata de acero al carbono sin recubrimiento.
- ✓ Hipoclorito de sodio y calcio: cerámica, baldosa común o de goma.
- ✓ Oxígeno: acero inoxidable.
- ✓ Dióxido de cloro y peróxido: Cerámica o poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Equipos y accesorios como filtros, bombas, y válvulas son fabricados con aleaciones metálicas apropiadas para las condiciones de cada etapa.

En las etapas altamente corrosivas como cloración y dioxidación se utilizan aceros inoxidables especiales como de tipo 317 L o el mismo titanio. Los canalones, telas y soportes pueden ser fabricados enteramente en plástico. En el caso de hipocloritos y extracción alcalina el acero inoxidable 304 es el indicado.

### **Soluciones de hipoclorito de sodio.**

Los equipos para manejar las soluciones de hipoclorito de sodio deben ser construidos de materiales resistentes a la corrosión. Pueden utilizarse recubrimientos no metálicos, de caucho, PVC o PVF2. Las resinas de poliéster deben ser usadas con precaución porque son inestables a pH bajos y las soluciones de hipoclorito las atacan rápidamente. Las soluciones de hipoclorito son tan corrosivas como el dióxido de cloro hacia los metales. Se alcanza un máximo en la velocidad de corrosión del acero inoxidable con

soluciones de hipoclorito a un pH de 7 probablemente debido a la presencia del ácido hipocloroso.

### **Peróxidos**

El licor de blanqueo con peróxidos se prepara de una mezcla de soluciones de silicato de sodio, sulfato de magnesio, hidróxido de sodio, y peróxido de hidrógeno, o una mezcla de silicato de sodio, sulfato de magnesio, peróxido de hidrógeno y peróxido de sodio.

Las soluciones de silicato de sodio e hidróxido de sodio, pueden manejarse en equipos de acero al carbono y equipos con recubrimientos de acero inoxidable. La solución de sulfato de magnesio debe ser manejada en acero inoxidable tipo 316 mientras que la solución de peróxido de hidrógeno debe trabajarse en tuberías y equipos de aluminio. Las soluciones de peróxido de sodio y el licor de blanqueo con peróxido deben trabajarse en equipos y tuberías de acero inoxidable tipo 316 o 317. La tubería y el equipo en la etapa de peróxido en la planta de blanqueo debe ser acero inoxidable 316. Las bombas son fundiciones de hierro con recubrimientos de acero inoxidable.

## **IMPACTO AMBIENTAL**

La situación por la cual atraviesa la industria de pulpa y papel a nivel mundial es difícil; ya que enfrenta problemas como: la escasez de capital, de materias primas, y el más importante de todos, el impacto que la industria tiene sobre el medio ambiente.

Las legislaciones en materia ambiental son cada vez más severas y los grupos ecologistas ejercen una gran presión pretendiendo cambiar las actitudes de autoridades, productores y consumidores. Las regulaciones ambientales y gubernamentales están continuamente forzando a la industria de la pulpa y papel a adoptar nuevas tecnologías para reducir el impacto que los efluentes de plantas de pulpa y blanqueo tienen sobre aguas receptoras y la atmósfera. La industria enfrenta también la limitación de los recursos forestales de donde viene su principal materia prima.

Hasta hace unas décadas no se daba la debida importancia a los problemas de contaminación por lo que las industrias contaminaban a gran escala y sólo hasta que las consecuencias fueron considerables se empezó a tomar conciencia del problema y al descubrir que este es enorme; cada vez es mayor el número de consumidores que tienen interés en el perfil ambiental de los productos.

### **Recursos Forestales**

En el curso de la historia los bosques fueron apreciados por los múltiples productos y beneficios que rendían. En cambio en la edad moderna, los bosques fueron considerados esencialmente como fuente de un solo producto: la madera, lo que dio como resultado la extracción intensiva de la madera en detrimento del resto del ecosistema forestal hasta llegar muchas

veces a su destrucción. Cuando la tala de árboles se hace de manera tecnificada no se rompe el equilibrio natural de ecosistema; sin embargo en muchos países se hace sin ningún control con lo que se arrasa con una porción del bosque.

No obstante la demanda de papel continúa por lo que es necesario utilizar de manera racional y eficiente el suministro actual de madera y aprovechar materia primas alternativas como las plantas no maderables, las fibras recicladas, o los “residuos” de otras plantaciones que en realidad son biomasa como se plantea en este trabajo de grado con la hoja de la palma africana.

### **Impacto sobre los efluentes**

En la industria de pulpa y papel los procesos más contaminantes son las etapas de cocción y blanqueo. La tecnología del blanqueo se desarrolló de manera independiente a la del pulpeo y con el tiempo se desarrollaron procesos de blanqueo altamente eficientes como las etapas C / E pero con pocas consideraciones para la eliminación del licor residual, por lo que son la principal fuente de desechos orgánicos; ya que no se reciclan porque tienen un alto nivel de cloruros corrosivos.

En el proceso convencional de blanqueo se forman cantidades considerables de componentes orgánicos clorados particularmente en las etapas de cloración y extracción alcalina. Los residuos líquidos industriales (RILES) se caracterizan por la presencia de compuestos AOX (haluros orgánicos absorbibles), tales como: dioxinas, cloroformo y compuestos cloro fenólicos (estos últimos muy peligrosos por ser liposolubles, esto es, acumulables en los tejidos grasos de los animales, y por ser altamente tóxicos y difíciles de degradar).

La formación de AOX se puede estimar a partir de la expresión:

$$\text{AOX} = 0,1(\text{C}+\text{H}/2+\text{D}/5)*(1-\text{R})$$

En donde:

AOX se expresa en kg / tonelada de pulpa.

C, H y D como cloro activo en Kg. / tonelada de pulpa.

Y R es la eficiencia de eliminación de AOX en el tratamiento biológico si lo hay.

Por lo que se ve que para la misma cantidad de cloro activo el hipoclorito produce la mitad de AOX.

El material orgánico clorado puede dividirse en compuestos de alto y bajo peso molecular con una línea de división de 1000. La fracción de alto peso molecular no es tóxica directamente, sin embargo, la degradación biológica de estos compuestos puede alterar los productos de bajo peso molecular que son tóxicos, mutagénicos y cancerígenos, por lo que es más importante el tipo de desecho en el efluente que la cantidad.

En la planta de blanqueo es en donde se produce el mayor número de productos contaminantes por ser la mayor parte de ellos en forma de materia orgánica disuelta, que tiene un carácter marcadamente reductor y por tanto absorbe el oxígeno disuelto en el agua.

Dos fuentes principales se originan en las distintas fases de blanqueo, correspondiendo la primera fase a la coloración con unos líquidos destacadamente ácidos y la segunda fase a la extracción con hidróxido de sodio con una reacción totalmente alcalina, ambos efluentes con reacciones opuestas.

La primera fase se caracteriza por una baja concentración en cuanto a sustancias consumidoras de oxígeno, por su débil coloración así como por su elevado volumen. La segunda fase se distingue por su alta demanda de oxígeno su fuerte coloración y su menor volumen.

La coloración es originada principalmente por las sales alcalinas de lignina y su DBO por los productos de degradación de la celulosa.

El material que va a la alcantarilla es generalmente caliente, tiene un alto contenido orgánico, es oscuro, tóxico hasta cierto grado, contiene cantidades variables de sólidos suspendidos y constituye el efluente de mayor problema del pulpeo. La toxicidad del efluente se debe principalmente a resinas y ácidos grasos que pueden llegar a ser mas tóxicos clorados. De tal manera que la captura del licor en el proceso de blanqueo es de seria importancia.

Por todo esto el blanqueo de la pulpa es, la etapa más contaminante del proceso de fabricación del papel y es en los efluentes de color muy oscuro en donde tienen mayor impacto; tradicionalmente para combatir el problema de la contaminación del agua se utilizan tres métodos para reducir la toxicidad y la mutagenicidad de los efluentes.

- ✓ Tratamiento biológico.
- ✓ Aumento de la alcalinidad.
- ✓ Tratamiento con pequeñas dosis de dióxido de azufre.

Siendo el tratamiento biológico el más usado, tratando el efluente en una laguna de aireación, sistema de lodo activado u otro biotratamiento, este procedimiento reduce el contenido de cloruros orgánicos y degrada los fenoles clorados, uno de los principales componentes tóxicos. El color sin embargo, no se reduce de manera importante.

El blanqueo de pulpa se halla en un estado cambiante; los esfuerzos se dirigen no sólo a tratar los efluentes sino a atacar el problema de raíz con modificaciones en el proceso de blanqueo, los primeros pasos se han orientado a eliminar completamente el cloro o por lo menos sustituirlo buscando la optimización de nuevos agentes de blanqueo con los cuales se obtengan blancuras elevadas y estables, que permitan el uso de estas pastas para la fabricación de papeles de impresión de alta calidad. Por las consideraciones anteriores en este proyecto se trabajó con hipoclorito de sodio en la primera etapa y peróxido de hidrógeno en la segunda ya que este es un reactivo versátil muy usado en el blanqueo de pulpa debido a las bajas emisiones al ambiente, costos más bajos de blanqueo y mejor calidad de pulpa.

Además de los aspectos químico/maderables del blanqueo, este proceso requiere agua en grandes cantidades (17000-24000 gal. de agua/ Ton. pulpa blanqueada) (TAPPI PRESS, 1979) por lo que las tendencias van hacia un uso menor del agua, con la meta de completar un reciclo tanto como sea posible (sistema cerrado).

En la tabla 23 se muestran los requerimientos de aguas de plantas más antiguas y más actuales, basados en el tipo de producción a partir de madera.

**Tabla 17. Uso neto de agua (flujo de efluente) de la manufactura de productos de pulpa.**

<b>Proceso</b>	<b>Típico (gal/ton)</b>	<b>Plantas nuevas (gal/ton)</b>
a. Kraft sin blanquear	15000-40000	20000
b. Blanqueado de Kraft	15000-35000	20000
c. Sulfito sin blanquear	15000-50000	25000
d. Blanqueado de sulfito	30000-50000	40000
e. Semiquímico	8000-40000	10000
f. Pulpa de sosa	3000-48000	4000

**(Manual del Agua Nalco, 1990)**

### **Contaminación atmosférica**

La contaminación del aire es un problema menor en la etapa de blanqueo comparado con la contaminación del agua. No obstante algunos agentes de blanqueo como cloro, dióxido de cloro y dióxido de azufre son gases demasiado tóxicos. Bajo condiciones normales de operación las descargas a la atmósfera son bajas por lo que no causan problemas ambientales externos. Los accidentes o la operación inadecuada pueden sin embargo causar condiciones peligrosas en el área que rodea la planta.

## CONCLUSIONES

- Se establecieron las condiciones de operación para efectuar las reacciones de blanqueo y así obtener pulpas blancas con buenas resistencias físico-mecánicas que permiten emplearlas en la fabricación de papel de impresión y demás productos semejantes a los fabricados en la actualidad a partir de bagazo de caña.
- El proceso de pulpeo semiquímico a la soda empleado es adecuado para la producción de pulpas a bajo costo, ya que no requiere de equipos costosos como ocurre con otros procesos de pulpaje que operan a altas temperaturas.
- Los rendimientos de las pulpas obtenidas oscilaron 46.1 y 70.1% para las pulpas morenas por el alto contenido impurezas que presenta el material, pero se sitúan dentro de los porcentajes aceptados en la industria para los procesos semiquímicos.
- Se logró mediante un proceso de blanqueo de dos etapas H-P un porcentaje de blancura de 81.13% ISO (pulpa 6) catalogando estos resultados como pulpas blancas y obteniéndose rendimientos de blanqueo entre el 65.15 y el 78.40%
- El análisis del número de kappa para las pulpas blanqueadas indica un porcentaje de deslignificación que oscila entre el 80.84 y el 86.40%, lo que indica que en el proceso de blanqueo se logra extraer una buena cantidad de lignina presente en el material fibroso.
- De acuerdo con los datos de blancura obtenidos para las diferentes pulpas se puede concluir que a mayor porcentaje de peróxido de

hidrógeno y tiempo de reacción se incrementa el porcentaje de blancura de las pulpas.

- Las mejores pulpas obtenidas después del tratamiento con peroxiborato son las que se trabajaron con 3% de peróxido, 1.5% de bórax y durante 3 horas de reacción ya que presentaron el mejor grado de blancura (81.3% ISO) y mejor comportamiento en las propiedades físico-mecánicas para un freeness de 200 ml. Presentando los siguientes valores: resistencia a la tensión 6000 m, resistencia a la explosión 61.6 y resistencia al dobléz 53. El mejor valor de resistencia al rasgado fue de 57 y contrario a las demás propiedades se obtuvo para un freeness de 400 ml. ya que esta propiedad depende de la longitud de la fibra.
  
- En el experimento de impregnación con una solución de bórax en las hojas llevadas al horno a 80°C indicó que la adición de una cantidad relativamente pequeña de bórax incrementa enormemente la estabilidad de la blancura de las hojas a largo plazo, lo que proporciona una ventaja a los problemas de reversión de blancura o amarillamiento en el almacenamiento.
  
- Los resultados obtenidos para las pruebas de resistencia a la tensión, explosión y dobléz, muestran un aumento de la propiedad al aumentar el tiempo de refino y varían dentro de los siguientes rangos: resistencia a la tensión 3200-7300, resistencia al dobléz: 3 – 154, resistencia a la explosión: 37 – 61.6, siendo las mejores propiedades obtenidas para la pulpa 7, lo cual es coherente ya que tiene solo una etapa de blanqueo.

- Se concluye que desde el punto de vista de la perspectiva económica, existe un gran deseo por contar con secuencias de blanqueo breves. Por mucho tiempo la secuencia de blanqueo en dos etapas ha sido prometedora en el laboratorio, pero las características de “amarillamiento” de la pulpa obtenida han estado en un nivel superior a lo aceptable. En este trabajo se presenta una nueva alternativa al trabajar en la segunda etapa de blanqueo con peroxiborato la cual aumenta la blancura con alta eficiencia y ayuda a retardar el proceso de reversión de color en las pulpas por más tiempo.
- El proceso de blanqueo para pulpas de alto rendimiento obtenidas a partir de la hoja de la palma africana en dos etapas H-P ha demostrado ser eficiente al obtener alto grado de blancura (81.3% ISO) y ha demostrado ser una buena alternativa para contribuir a la estrategia de cero desechos en la industria de la palma de aceite ya que presenta a la hoja como un material con buenas características papeleras teniendo en cuenta que su transformación presenta la mitad de descargas de AOX a los efluentes comparada con el proceso tradicional de blanqueo.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda optimizar la etapa de lavado al trabajar en el laboratorio en cada uno de los procesos de obtención de pulpa y blanqueo, ya que en estas etapas se pierde gran parte del material viéndose esto reflejado en los rendimientos.

Se propone investigar y experimentar con nuevos agentes de blanqueo para reemplazar la etapa de hipoclorito de sodio y así eliminar los compuestos organoclorados presentes en los efluentes residuales.

Ya que se ha determinado que la hoja de la palma africana puede ser una materia prima con buenas propiedades papeleras, podría desarrollarse un estudio de factibilidad técnico-económico del montaje de una planta de pulpa y papel que emplee este residuo de la industria palmera, la cual en la actualidad se encuentra en crecimiento en el ámbito regional y nacional.

Difundir entre los productores de aceite de palma los resultados de éstos proyectos para impulsar la realización paralela de una planta productora de pulpa y papel con base en la hoja de la palma africana.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALARCÓN; Ivanoc. Influencia de inhibidores en el blanqueo soda-oxígeno de pulpa kraft de bagazo de caña. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 1988.
2. ALFTHAN, Johan Carl y ANDERSON, Elisabet. High temperature peroxide bleaching of sulphate pulp. Suensk papperstidning. No. 15, 1977. pp 480-482.
3. ARGYROPOULOS, D.S, MOORE, D.B. TAPPI J. 80(13):1-14(2000). Trial Using in situ peroxyborate for the brightness retention of TMP.
4. ASENJO MARTINEZ, José. Introducción a la teoría, características y ensayos de los papeles de impresión y escritura. Madrid, Instituto papelerero español (IPE), 1979. Vol. 1. pp. L VIII 14-22.
5. BRAUNS, Friedrich Emil y BRAUUNS, Dorothy Alexandra. The Chemistry of lignin. Academic Press Inc. London, 1996. p 802.
6. CACERES ROJAS, H. y VARGAS G., J.M. Influencia del dióxido de titanio sobre las características de CIPRES blanqueada con peróxido de hidrógeno. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, 1983. pp 20-27.
7. CACERES, Lilia de. Métodos de análisis empleados en la industria papelera. 1ed. CICELPA -UIS. 1978.
8. D'ALMEIDA, MARIA LUIZA. CELULOSA E PAPEL. Tecnología de fabricação da pasta celulósica. vol I. Centro técnico em celulose e Papel. Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo..Departamento de divulgação do IPT; 2ª edição. São Paulo.1988.p 30-34,45-58,74-75,391-400.
9. DUEÑAS, San Juan. Obtención de pulpas y propiedades para papel. Guadalajara, Jalisco, México. 1997.
10. FEDEPALMA. Abril-Mayo [www.fedepalma.org](http://www.fedepalma.org).

- 11.FLORES, V. Blanqueo de pulpa de Bagazo de caña con oxígeno. España: Asociación de investigación técnica de la industria papelera (ATCP). No.6, 1972. pp. 292.
- 12.GRANT, Julius. Manual sobre la fabricación de pulpa y papel. México, Continental, 1968.
- 13.HART, Roger J. Chelating agents in the pulp and paper industry. Atlanta: TAPPI. Vol. 64, No. 3, Mar 1981. pp 43-44.
- 14.HOFFMANN. CURSO Blanqueo de pulpas químicas .Guadalajara.1979. pp. 2-14,21-25.
- 15.HOOK, Jan. Peroxide bleaching opens new potential forgroundwood pulp. San Francisco: Pulp and Paper International. 1975. pp. 45-48.
- 16.INCONTEC. Instituto colombiano de normas técnicas y de certificación (NTC).
- 17.KAMARUDDYN, ASAN y otros. Revista Palmas. “Pulpa y papel hechos de fibras de palma de aceite”. Vol. 19 No. 2. 1998. pp. 97-69.
- 18.LACHENAL D. y CHOUDENS de C. Hydrogen peroxide as a delignifging agent. Atlanta: Tappi. Vol. 68, No. 4, 1981. p. 24.
- 19.LIBBY, C.Earl. Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo 1. Editorial CECSA. México 1976.
- 20.NALCO. Manual del agua. New York: MaGraw-Hill book company, 1992; p. 30.1-30.19.
- 21.NAVARRO, Sagrista J. El blanqueo de pastas. Agentes blanqueantes. Zaragoza (España): Investigación y técnica del papel. Vol. 22, No. 83, ene 1985. pp. 415-461.
- 22.NORMAS TAPPI STANDARS AN SUGOESTED METHODS: Technical Association of the Pulp and Paper Industry. New York.
- 23.OCAMPO, Duran Álvaro. Las Palmas, una Estrategia de Vida Tropical. Universidad de los Llanos. Fundación Horizonte Verde. Villavicencio bagazo de caña (Colombia). Abril-Mayo. E-mail: alvarod@hilderstone.ac.uk [www.lead.virtualcentre.org](http://www.lead.virtualcentre.org).

24. PATT, Rudolph y FAIX, Oskar. Aplicación del peróxido en el blanqueo de celulosas. Química y tecnología del blanqueo moderno de pulpa celulósica. Guadalajara, Universidad de Guadalajara, 1982. Cap. 8, p. 20.
25. PERRY, Robert H. Manual del Ingeniero Químico. Sexta edición. McGraw-Hill 2000.
26. PETERS, Marx. Chemical engineering plant design. New York: MacGraw-Hill Book Company, Inc. 1959.
27. QUESADA, H. German .Programa nacional de palma africana: Cultivo e industria de la palma aceitera (*Helaseis Guineensis*). Documento preliminar para la discusión que consiste en una guía preliminar para el productor. Ministerio de agricultura y ganadería .Dirección de investigaciones. [mailto:%20.asagrecia@grecia.infoagro.go.cr](mailto:asagrecia@grecia.infoagro.go.cr)
28. RAPHSON, W. Howard. Preoxides in pulp bleaching process. The bleaching of pulp. Atlanta: Tappi Monograph. Serie 27, Cap. 9, 1963. pp.31.
29. REGLA. Peróxidos. Blanqueo de pulpas químicas. México, Universidad de Guadalajara, 1979.
30. RYDHOLM, S.A. Pulping Processing. New York, Interscience, 1985.
31. SARKANEN, K. V.Y LUDWING, G. H. Lignins: Ocurrence, formacion, structure and reactions. Jhon Willey & sons, Inc. EEUU.1971.p 642.
32. SHEVCHENKO, Serger, W. Bailey George. Nanoscale morphology of lignins and their chemical transformation products. J Tappi March.1996.79.3.p227-236.
33. TAPPI PRESS. The bleaching of pulp. Tercera edición. Rudra P. Singh. Atlanta 1979.
34. VALLEJO, G. ICA. Palma africana: manual de asistencia técnica 22. Programa de oleaginosa perennes. Regional 5: Centro experimental de Palmira. 1978. p25-53,67-97.

35. VALDIVIESO, Luis. Tesis UIS. "Obtención y evaluación de pulpas a la soda fría obtenidas de la palma africana. 2003.